

Jani Pulkkinen

# Bitumiyksikön strippaushöyryn optimointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kemiantekniikka

Insinöörityö

15.2.2016

Tekijä(t) Otsikko	Jani Pulkkinen Bitumiyksikön strippaushöyryjen optimointi
Sivumäärä Aika	36 sivua+ 2 liitettä 15.2.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kemiantekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Kemiantekniikka
Ohjaaja(t)	Esa Tamminen, Prosessiasiantuntija Timo Laitinen, Lehtori
<p>Insinöörityö on tehty Nesteen öljynjalostamolle Porvoossa. Työn tavoitteena oli selvittää simuloimalla strippaushöyrymäärän vaikutuksia bitumiyksikön tyhjötislauskolonniin ja sen tuotteisiin.</p> <p>Bitumiyksikön kolonniin syötettävää strippaushöyryä on pidetty vakiovirtauksella usean vuoden ajan. Toisaalta ei ole ollut saatavilla tietoa siitä, millä tavalla strippaushöyryä pitäisi operoida ja miten strippaushöyryn muutokset vaikuttavat kolonnin erotuskykyyn. Nykyisellä strippaushöyrymäärällä on pystytty täyttämään tuotteiden latuvaatimukset, mutta oli syytä selvittää mahdollinen käyttämätön potentiaali strippaushöyryjä simuloimalla.</p> <p>Työssä tutustuttiin tislaukseen, jalostamon pohjaöljyketjuun ja bitumi-yksikköön, jotta oli mahdollista ymmärtää strippaushöyryn tarkoitus tyhjötislauksessa. Simuloinnit suoritettiin bitumiyksikön tyhjötislauskolonnista Neste Jacobsin suunnitteleamalla simulointimallilla. Simuloinnit suoritettiin vaihtelemalla kolonnin huipun painetasoa ja strippaushöyrysyötön määrää, ja tarkasteltiin vaikutuksia kolonnista saatavien tuotteiden määrään sekä laatuun. Simulointien jälkeen tuloksista tehtiin graafiset mallit helpottamaan mahdollisia strippaushöyryjen koeajoja tulevaisuudessa.</p> <p>Simulointien tuloksia käsiteltäessä saatiin tietoa siitä, että strippaushöyryllä on merkittävä vaikutus bitumiyksikön tyhjötislauskolonnissa. Huomattiin, että strippaushöyrymäärällä voidaan osittain kompensoida kolonnissa tapahtuvaa paineenvaihtelua joka on vuositason la merkittävä. Kolonnissa vallitseva matala paine etenkin talvikuukausien aikana mahdollistaisi strippaushöyrymäärän kasvattamisen ja sitä kautta tuotejakeista saadaan lisäarvoa. Strippaushöyryjä on mahdollista operoida tehokkaammin kolonnin painetason mukaan sekä kustannusten, tuottavuuden että kolonnin toiminnan kannalta.</p>	
Avainsanat	tyhjötislaus, höyry, tislaukset, simulointi, optimointi

Author(s) Title	Jani Pulkkinen Bitumen unit stripping steam optimization
Number of Pages Date	36 pages+ 2 annex 15 February 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Chemical Engineering
Specialisation option	Chemical Engineering
Instructor(s)	Esa Tamminen, Senior Process Specialist Timo Laitinen, Lecturer
<p>This Bachelor of Engineering thesis was made for the Neste Oil refinery in Porvoo, Finland. The objective of this thesis was to simulate stripping steam and to find its effects on a vacuum distillation column.</p> <p>The stripping steam fed into the Bitumen unit column has been kept at a constant flowrate for several years. On the other hand, information has not been available on the manner how the stripping steam should be operated and how the changes affect the column's separation ability. With the current amount of stripping steam, the bitumen unit has been able to fulfill the product quality standards, but it was necessary to find out the possible untapped potential by simulating the bitumen unit stripping steam.</p> <p>The thesis studies the basics of distillation, the Porvoo refinery bottom oil chain and bitumen unit so it would be possible to understand the purpose of stripping steam in vacuum distillation. The simulations were conducted on a Neste Jacobs simulation model of the vacuum distillation column. Simulations were performed by varying the pressure level of the column top and the feed of the stripping steam. The effects of the stripping steam on the vacuum distillation unit's product amount and quality were examined. After the simulations, graphical models were prepared to facilitate possible stripping steam operating tests in the future.</p> <p>After the simulation results were examined, it was found that processing of the stripping steam has a significant impact on the bitumen unit vacuum distillation column. It was also found that the amount of stripping steam feed can partially compensate the pressure variation in the vacuum column. The amount of pressure variation is significant on an annual basis. Prevailing low pressure in the top of the column, especially during the winter months, would allow to increase the stripping steam feed; hence, the product fractions would bring more yield. Simulations showed that it would be possible to operate the stripping steam feed in accordance with the prevailing conditions in the vacuum column, taking constraints into account. This would allow a more cost-efficient and productive operation of the column.</p>	
Keywords	vacuum distillation, steam, distillation, simulation, optimization

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Neste Oil Oyj	2
3	Tislaus	2
3.1	Teoria	2
3.2	Tislauskolonnin rajoitteet	5
3.3	Tislauskäyrät	5
3.4	Tislaushäntä ja leikkauspiste	7
3.5	Vesihöyrytislaus	8
3.6	Tyhjötislaus	9
4	Pohjaöljytuoteketju	13
5	Bitumi-yksikkö	15
5.1	Syötöt ja tuotteet	16
5.1.1	Syötöt	16
5.1.2	Tuotteet	17
5.2	Tyhjötislauskolonni DA-31001	19
5.3	Ylimenojärjestelmä	21
5.4	Tyhjökolonnin DA-31001 paine	23
6	Simuloinnin lähtökohdat	25
7	Simulointi	27
7.1	Painetasojen valinta simulointiin	28
7.2	Strippaushöyrymäärän valinta simulointiin	29
7.3	Simulaattori	29
8	Tuottavuus	30
9	Yhteenveto	33
10	Suosituks	34
	Lähteet	36

## Liitteet

Liite 1 McCape-Thiele menetelmä

Liite 2 Bitumiyksikön strippaushöyryn koeajosuunnitelma



## Lyhenteet

GA	Pumppu
DA	Kolonne
BA	Uuni
BIY	Bitumi-yksikkö
RT3	Raakaöljytislaus
TT2	Tyhjötislaus 2
TL1	Tuotantolinja 1
TL3	Tuotantolinja 3
TL4	Tuotantolinja 4
PÖY	Pohjaöljy-yksikkö
KAKT	Kevyt kaasuöljy
KART	Raskas kaasuöljy
ÖP	Pohjaöljy
kPa	Kilopascal
kPa(g)	Kilopascal normaalipaineessa
kPa(a)	Kilopascal absoluuttisessa paineessa
TBP	True boiling point

## 1 Johdanto

Tämä insinöörityö on tehty Porvoossa toimivalle Neste Oilin öljynjalostamolle autta-  
maan jalostamolla olevan bitumiyksikön (BIY) strippaushöyryjen operoinnissa. Yksikkö  
sijaitsee Porvoon jalostamolla tuotantolinja 1:llä (TL-1) ja se on ollut toiminnassa vuo-  
desta 1988. Yksikköön syötettävien höyryjen selvitys on ollut esillä usean vuoden ajan.

Energiatehokkuuden arvo on kasvanut vuosi vuodelta tärkeämmäksi ja käyttöhyödyk-  
keistä höyry on tärkeä osa öljynjalostusprosesseissa. Energian hinta ja jalostamon  
käyttökustannukset ovat nousseet kasvaneiden tehokkuus- ja laatuvaatimusten myötä  
vuosi vuodelta. Valmistetun 5 bar(g):n höyryn hinta oli vuonna 2014 keskimäärin 25 €/t.  
Bitumiyksikkö käyttää noin 4,5 t/h höyryä, joten vuorokausi hinnaksi tulee 2700 €. Höy-  
ryä käytetään tyhjötislausyksikössä, joten nämä lähtökohdat antavat hyvät perusteet  
bitumiyksikön strippaushöyryn optimointiin. Tässä työssä optimointi voi tarkoittaa myös  
höyrymäärän lisäystä, mikäli lisäyksellä saadaan lisäarvoa tislauksessa saatavista tuo-  
tejakeista laadullisesti tai määrällisesti.

Tämän työn tavoitteena on ollut selvittää simuloimalla strippaushöyrysyötön määrän  
vaikutuksia tyhjötislauskolonniin ja tuotteisiin eri painetasoilla. Työssä tarkasteltiin, on-  
ko nykyinen strippaushöyrymäärä sopiva vai kannattaako strippaushöyryä käyttää  
enemmän tai vähemmän. Tulokset mallinnettiin graafisesti, jotta nähdään onko strip-  
paushöyryjen muutoksilla vaikutuksia tyhjötislauskolonnista saataviin tuotteisiin laadul-  
lisesti tai määrällisesti. Simuloinnista saatujen tuloksien perusteella on mahdollista suo-  
rittaa bitumiyksikössä koeajot ja helpottaa kolonnin strippaushöyryjen operointia tule-  
vaisuudessa kustannustehokkaasti kolonnin painetason vaihdellessa.



## 2 Neste Oil Oyj

Vuonna 1965 Neste Oil Oyj aloitti öljynjalostus toiminnan Porvoon Sköldvikissä nousevan öljynkulutuksen vuoksi. Jalostamon peruskivi muurattiin syyskuussa 1964, mutta rakentaminen suoritettiin neljässä vaiheessa vuosina 1964-1972. Ensimmäinen käynnistetty yksikkö oli tyhjötislausyksikkö. Vuonna 1973 päätettiin sijoittaa Porvooseen vielä uusi B-jalostamo, joka oli rakenteeltaan suoratislausjalostamo.

Alkuperäinen jalostamo on muuttunut vuosien varrella nykyaikaiseksi complex-jalostamoksi, jonka laaja ja monipuolinen krakkauskapasiteetti antaa mahdollisuuden laajaan tuotantorakenteeseen ja nostaa tuotannon jalostusarvoa

Suurimmat 2000-luvun rakennushaasteet olivat tuotantolinja 4:n (TL-4) ja kahden biodiesellaitoksen rakentamiset. Jalostamolla valmistettavat päätuotteet ovat bensiini ja diesel. Jalostamo valmistaa myös perusöljyjä, lento- ja laivaliikenteen polttoaineita, bensiinikomponentteja, erikoispolttoaineita, liuottimia, bitumia ja lämmitysöljyjä. Porvoon jalostamon raakaöljyn vuosikapasiteetti on noin 14 miljoonaa tonnia. Porvoon jalostamon operointikäytäntö on muuttunut joustavaan operointiin vastaamaan tämänhetkistä markkinatilannetta.

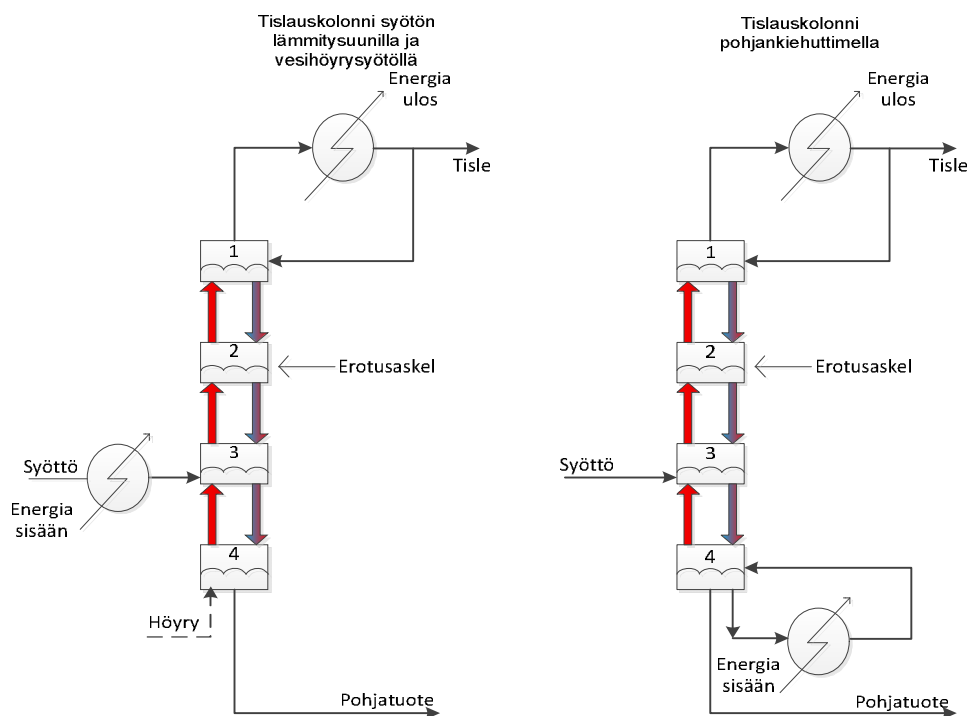
## 3 Tislaus

### 3.1 Teoria

Tislaus on prosessi, joka kuluttaa energiaa runsaasti juurikaan lisäämättä tuotejakeiden sisältämää energiamäärää, mutta siitä huolimatta se on paras ratkaisu öljyteollisuudessa erottamaan raakaöljystä eri tuotejakeet. Tislaus voidaan jakaa karkeasti laboratoriomittakaavan ja tehdasmittakaavan tislausprosesseihin. Tislauksessa ei tapahdu kemiallisia reaktioita, vaan se on täysin fysikaalinen erotusprosessi. Jokaisella hiilivedyllä on omat ominaisuudet ja käyttötarkoitukset. Tislaus perustuu haihtuvuuseroihin, joita on eri hiilivedyillä. Erilaisilla hiilivedyillä on erilainen höyrynpaine eli haihtuvuus eri lämpötiloissa. Mitä suurempi suhde aineiden kiehumispisteillä on, sitä helpommin hiilivedyt erottuvat toisistaan. Tällä menetelmällä öljynjalostusprosessissa saadaan eroteltua toisistaan matalassa lämpötilassa höyrystyvät kevyet hiilivedyt ja korkeassa lämpötilassa höyrystyvät raskaat hiilivedyt [Sandelin 1996:3].

Alla on listattu höyrynpaineeseen liittyviä ominaisuuksia:

- Tislaus tapahtuu, koska komponenttien haihtuvuus eroaa nesteseoksessa
- Puhtaan nesteen sanotaan kiehuvan kun sen höyrynpaine on yhtä suuri kuin ympäröivä paine
- Nestemäisen seoksen höyrynpaine ja kiehumispiste riippuvat siinä olevien komponenttien mooliosuuksista
- Korkean höyrynpaineen omaavat hiilivedyt kiehuvat matalammissa lämpötiloissa

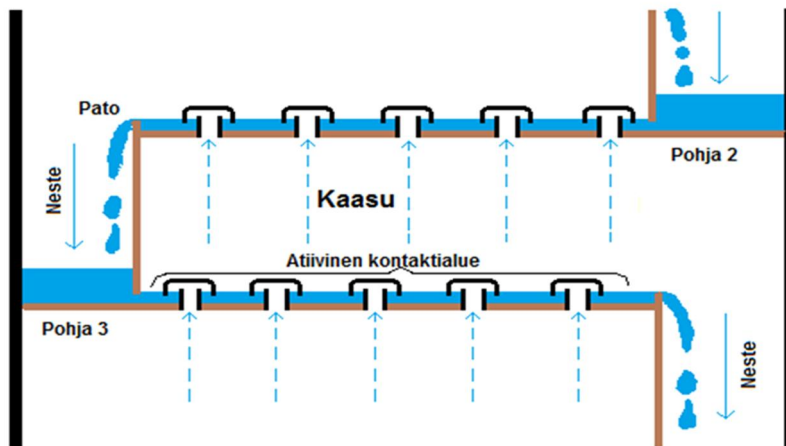


Kuva 1. Tislauskolonni ja lämmöntuontimahdollisuudet

Tislaus suoritetaan kolonnissa (kuva 1), jossa neste virtaa alaspäin palautusputkea pitkin painovoiman vaikutuksesta. Erotusaskelien välillä (ks. kuva 2, s.4) vallitsevan paine-eron vaikutuksesta kaasu virtaa ylöspäin pohjan ja nestepatjan läpi. Välipohjia kutsutaan myös erotusaskeleiksi. Yksi erotusaskel vastaa yhtä höyrystymisen-lauhtuminen sykliä. Jokaisessa erotusaskeleessa osa kevyemmistä komponenteista höyrystyy ja osa raskaammista komponenteista virtaa alaspäin. Kaasun ja nesteen välille on tärkeää järjestää mahdollisimman hyvä kontakti välipohjilla, koska jos ne sekoittuvat tarpeeksi, on pohjalta lähtevä kaasu tasapainossa pohjalta lähtevän nesteen

kanssa [APV, 1994:11]. Tisleen ja pohjatuotteen laatuvaatimus ratkaisee, kuinka monta sellaista erotusaskelta tislauskolonnein tarvitaan, joissa höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuvat.

Tislauksessa tuote kulkee nimellä tisle, ja haihtumatonta nestemäistä osaa kutsutaan pohjatuotteeksi. Tislauksen tarvitseman energian tuontiin voidaan käyttää pohjankiehu-tinta tai syötön lämmitysuunia, jossa osa syötöstä saadaan höyrystettyä jo ennen kolonniin johtamista [Pihkala 2011:2].



Kuva 2. Kaasu- ja nestefaasin sekoittuminen välipohjilla

Kolonniin on mahdollisuus lisätä vesihöyrystyttö, jolla saadaan laskettua syöttöaineen kiehumispistettä. Tällä ratkaisulla saadaan kolonnin ja syötön lämpötilatasoa laskettua. Vesihöyrytislausta käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.5. Tislauskolonneissa syöttökohdan yläpuolista osaa kutsutaan väkevöintiosaksi ja alapuolista osaa haihdutusosaksi [Kister 1989:1].

Tislauskolonnin suunnittelu perustuu syötön ja haluttujen tuotteiden määrään ja laatuun. Tislausta voidaan tehostaa lisäämällä kolonniin erotusaskelia eli välipohjia (kuva 2), joissa kaasu ja nestefaasit kohtaavat. Yksinkertaisessa kahden jakeen tislauksessa teoreettinen erotusaskeleiden määrä voidaan määrittää McCabe-Thiele (liite 1) menetelmällä. Useampia jakeita sisältävän syöttöaineen tislauksen suunnitteluun ja operointiin käytetään simulointimalleja [Tham 1997:15].

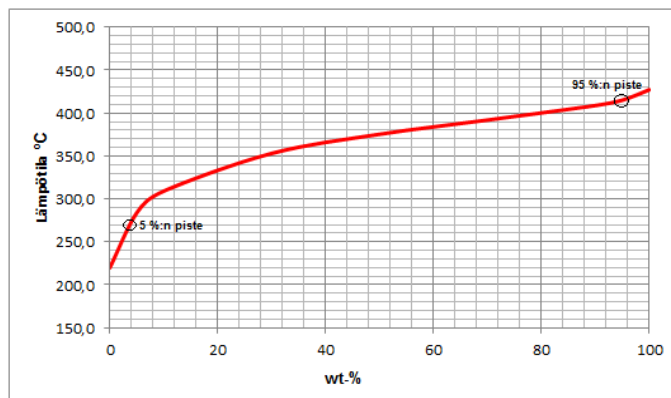
### 3.2 Tislauskolonnin rajoitteet

Tislaustapahtumalla on aina rajoitteita, joiden asettamissa rajoissa tislauskolonnia on operoitava. Rajoitteet muuttuvat useasti ympäristön vaikutuksesta. Alle on listattu tislaukseen liittyviä mekaanisia rajoitteita:

1. Tislauskolonnin suunnitteluarvot
2. Kiehuttimien teho
3. Lauhduttimien teho
4. Kolonnin tulviminen/kuivuminen/itkeminen
5. Pumppaus/venttiilirajoitteet

### 3.3 Tislauskäyrät

Tislauskäyrä on tyypillinen tapa esittää nesteseoksen kiehumisominaisuudet. Tislauskäyrästä ilmenee, kuinka monta prosenttia tietystä seoksesta on tislautunut tietyssä lämpötilassa. Voidaan ilmoittaa myös missä lämpötilassa tietty prosenttimäärä seoksesta on tislautunut [Sandelin 1996:3]. Kiehumisominaisuuksien selvittämiseksi on tutkittava tietyn jakeen tislauskäyrää. Kuvassa 3 on esitetty esimerkkinä kaasuöllyjakeen tislauskäyrä.

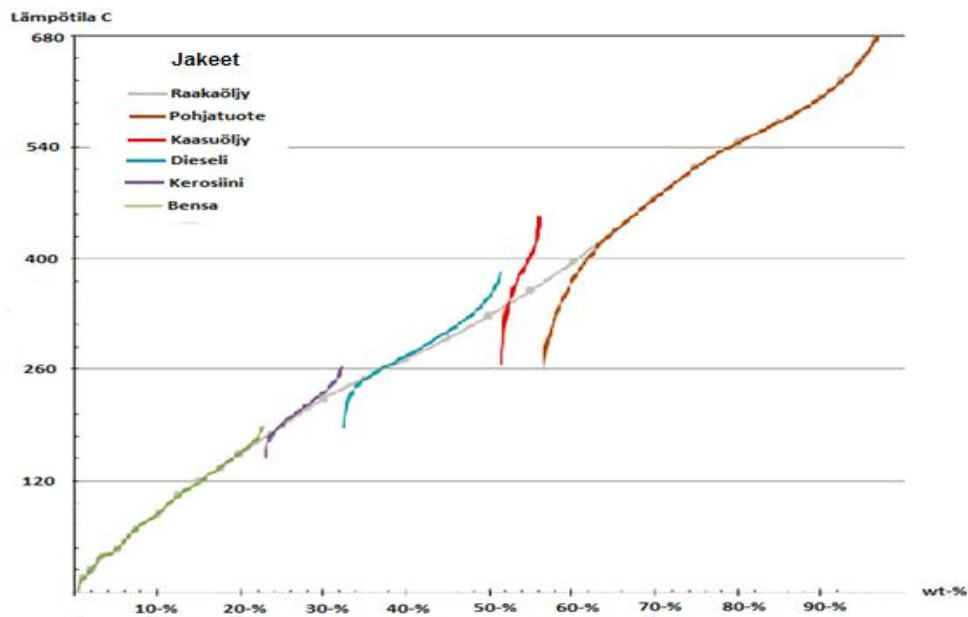


Kuva 3. Kaasuöllyjakeen tislauskäyrä

Kuvasta 3 nähdään, että kaasuöljyn tislalue on noin 220 °C à 420 °C, toisin sanoen lämpötilassa 220 °C kaasuöljyä on tislautunut 0 % ja lämpötilassa 420 °C kaasuöljyä on tislautunut 100 %.

Öljynjalostusteollisuudessa käytetään useasti tuotteiden laatuvaatimuksina tislauksikäyrän pisteitä 5 % ja 95 %. Esimerkiksi kaasuöljyn 95 %:n pisteeksi on määritetty lämpötila 415 C, mikä tarkoittaa sitä, että kyseisessä lämpötilassa 95 % syötön sisältämästä jakeesta on tislautunut (ks. kuva 3, s.5).

Lähes kaikille eri raakaöljytyypeille ja raakaöljyn sisältämille jakeille on olemassa tislauksikäyrä. Tislauksikäyriä on mahdollista määrittää usealla eri menetelmällä, jotka eroavat toisistaan määrittämislaitteiston ja tislauolosuhteiden osalta. Kuvassa 4 on esitetty yhden tyyppisen raakaöljyn tislauksikäyrä ja sen sisältämien jakeiden kiehumisalueet.

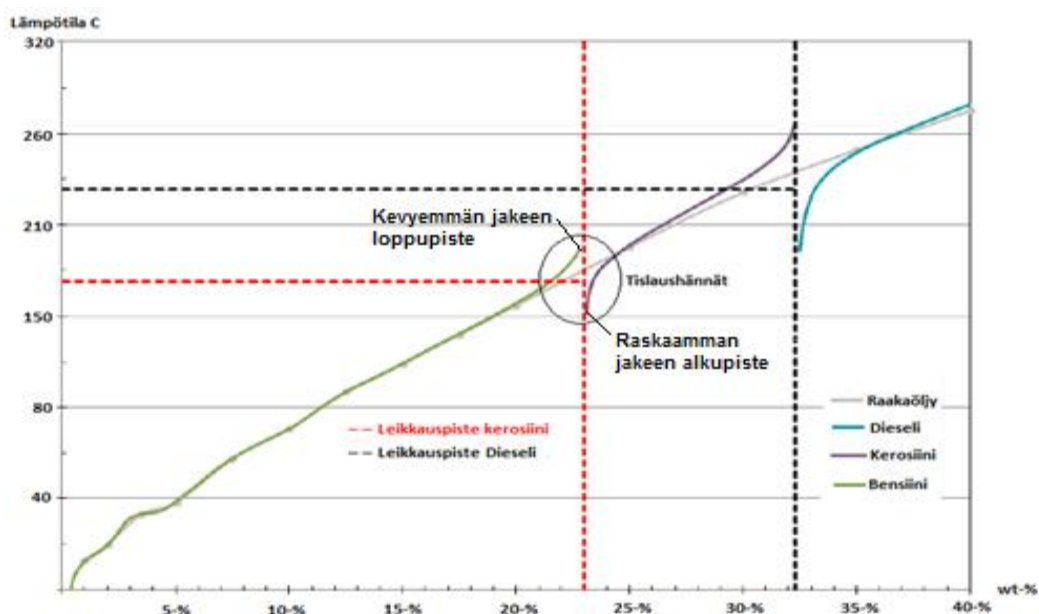


Kuva 4. Raakaöljyn tislauksikäyrä ja sen sisältämien jakeiden tislaualueet

Öljynjalostusteollisuudessa on mahdollista jo ennen raakaöljyn käyttöä, saada selvyys kuinka paljon mitäkin jaetta saadaan tislaamalla erotettua [Sandelin 1996:3].

### 3.4 Tislaushäntä ja leikkauspiste

Tislaushännät sijaitsevat tislaukikäyrän alku- ja loppupäässä. Tislaukikäyrän alkupäässä olevia jyrkkiä laskuja ja loppupäässä olevia jyrkkiä nousuja kutsutaan tislaushänniksi. Tislaushäntien avulla pystytään arvioimaan tislauksen tehokkuutta. Tislaushäntä johtuu yleensä huonosta erotuksesta kolonnissa. Erotustehokkuuden huonontuessa tislaushännät kasvavat. Jos kolonnin tisle sisältää paljon korkeissa lämpötiloissa kiehuvia hiilivetyjä, näkyy se tislaukikäyrässä jyrkkänä nousuna käyrän lopussa. Vastaavasti, jos pohjatuotteessa on paljon matalassa lämpötilassa kiehuvia hiilivetyjä, se näkyy taas pohjatuotteen tislaukikäyrässä alkuosan jyrkkänä pudotuksena (kuva 5). Tislaushännän muoto riippuu kyseessä olevasta erotuksesta ja tislaushäntä voi sijaita siis tislaukikäyrän molemmissa päissä [Sandelin 1996:3].

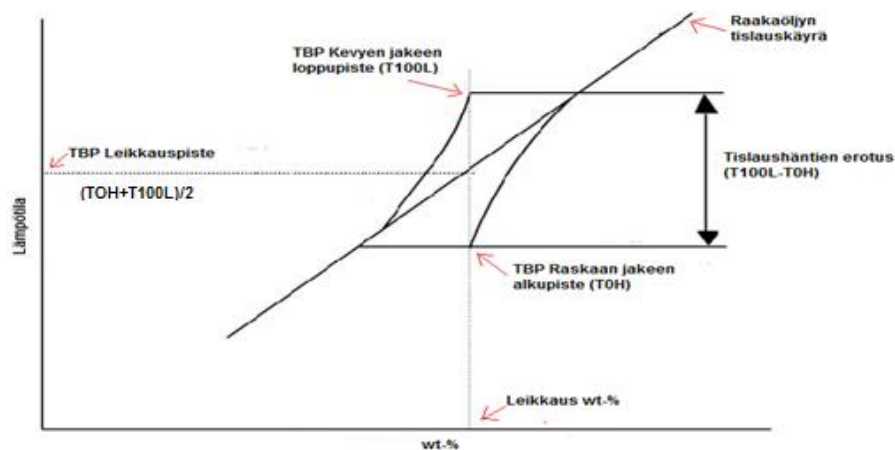


Kuva 5. Tuotejakeiden tislaushännät ja leikkauspiste [Jechura 2015:15]

Tislaushäntien erotus kahden jakeen alku- ja loppupisteissä pyritään saamaan mahdollisimman pieneksi, jolloin erotuskyky on hyvä. Hyvän erotuskyvyn johdosta kevyempää jaetta kulkeutuu vähemmän raskaan jakeen mukana ja vastaavasti raskaampaa jaetta kulkeutuu vähemmän kevyen jakeen mukana (ks. kuva 5 ja 6). Alku- ja loppupisteitä tislaushännissä ei saada koskaan täydellisiksi, vaan ne poikkeavat aina hiukan toisistaan, oli erotus sitten kuinka hyvä tahansa. Tuotteiden laatuvaatimuksina käytetään yleensä 5 %:n alkupistettä ja 95 %:n loppupistettä. Jos tuotteiden laatuvaatimuksina käytettäisiin 0 %:n ja 100 %:n pisteitä, tislaushäntien erotus kasvaisi, ja ne olisivat her-

kempiä virheanalyysille määritysmenetelmistä johtuen ja niistä olisi vaikeampi arvioida tislauksen tehokkuutta.

Leikkauspiste on yleensä tietty lämpötilan arvo kolonnissa, jonka ala- ja yläpuolella olevat jakeet eivät kuulu kolonnin tisleeseen eivätkä pohjatuotteeseen. Toisin sanoen kahden jakeen tislaushäntien erotusta raskaan jakeen alkupisteessä ja kevyen jakeen loppupisteessä kutsutaan leikkauspisteeksi (kuva 6). Leikkauspisteelle määritetään tarkempi lämpötila haluttujen tuotelaatujen mukaan. Leikkauspistettä muuttamalla voidaan vaikuttaa jakeiden saantoon, mutta on huomioitava rajoittavia tekijöitä tuotteiden laatuvaatimuksissa, koska ne muuttuvat leikkauksen muuttuessa. Leikkauspistettä nostamalla kevyempään jakeeseen jää enemmän raskaita jakeita ja vastaavasti leikkauspistettä laskemalla raskaampaan jakeeseen jää enemmän kevyitä jakeita [Crude distillation 2015:12]



Kuva 6. Tuotejakeen leikkaus ja tislaushäntien erotus [Crude distillation 2015:12]

### 3.5 Vesihöyrytislauus

Vesihöyrytislauus on yksi monista tislauksen menetelmistä. Tavallisessa tislaukskolonnissa käytetään lämmön tuontiin kiehuttimia ja lämmitysuuneja. Tavallisesta tislauksen prosessista eroten, vesihöyrytislauksessa käytetään höyryä komponenttien tislaukslämpötilan laskemiseen. Vesihöyryn lisääminen tislaukskolonniin muodostaa osan kolonnin kokonaispaineesta, jolloin syötössä olevien komponenttien osapaineet ja kiehumislämpötilat

laskevat. Höyrynpaine on siis yhtä suuri kuin syötössä olevien hiilivetyjen ja vesihöyryn osapaineiden summa.

Vesihöyrytislausta käytetään hiilivedyille, jotka vaativat korkeita lämpötiloja ja saattavat hajota lämpötilan vaikutuksesta jo ennen kiehumistaan. Vesihöyryn käyttäminen alentaa sekä tislaukskolonnin lämpötilaprofiilia että laskee syötössä olevien hiilivetyjen osapaineita, jolloin hiilivetyjen kiehumispisteet alenevat. Tästä syystä alemmassa lämpötilassa kiehuvat hiilivedyt saadaan tehokkaammin talteen vesihöyrytislauksella.

Tyypillinen vesihöyryn käyttökohde on tyhjötislaukskolonni, jossa vesihöyryllä tehostetaan tislaustapahtumaa. Vesihöyryä ei voida kuitenkaan lisätä loputtomiin, koska se voi aiheuttaa toiminnallisia ongelmia tislaukskolonnissa, kuten ylimenojärjestelmän ylikuormittumisen ja kolonnin tulvimisen. Helposti haihtuvien komponenttien tislauksesta vesihöyryn avulla kutsutaan myös strippaamiseksi. Strippauksella voidaan parantaa haluttujen tuotteiden saantoa ja laatua.

### 3.6 Tyhjötislaus

Tislaustapahtumaa kutsutaan tyhjötislaukseksi, kun tislataan normaalipainetta (101,3kPa) alemmassa paineessa. Tyhjötislausta käytetään normaalisti C20-C70 hiililuvun omaavien hiilivetyjen tislaukseen (Taulukko 1, s.10). Näitä hiilivetyjä ovat raskaat polttoöljyt, bitumi ja pohjaöljyt. Alipaineessa hiilivedyn kiehumispiste laskee, jolloin raskaammatkin hiilivedyt höyrystyvät.

Tyhjötislausta käytetään, koska edellä mainitut hiilivedyt tavallisessa paineessa vaatisivat erittäin korkeita lämpötiloja, ja näin ollen ne hajoaisivat termisesti. Koska hiilivetyjen kiehumispisteet riippuvat ympärillä vallitsevasta paineesta, syöttöaineen kiehumispiste alenee paineen laskiessa, ja silloin on mahdollista pitää operointilämpötilat kohtuullisina. Parempi tapa on siis laskea painetta kuin nostaa lämpötilaa tislattaessa korkeita lämpötiloja vaativia hiilivetyjä.

Jalostamoilla pohjaöljyä saadaan useasti enemmän, kuin sille on kysyntää, ja sen hintataso on matala. Tästä syystä pohjaöljy tislataan tyhjötislauksessa uudelleen, ja jakeet johdetaan jatkokäsittelyyn muihin yksiköihin, kuten krakkausyksikköön.

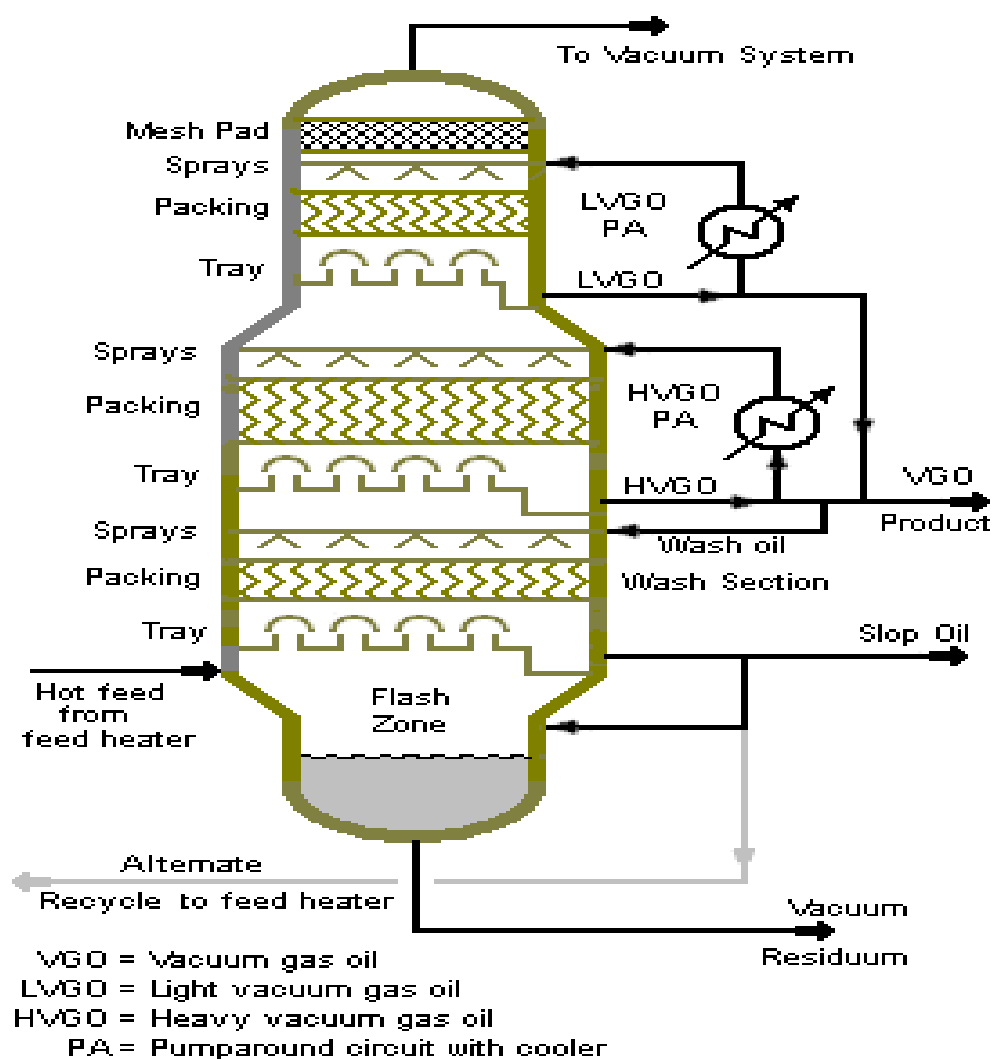


Taulukko 1. Parafiinisten hiilivetyjen kiehumispisteet hiililuvun mukaan. Parafiinisiksi hiilivedyiksi luokitellaan hiilivedyt, joilla on vähintään 20 hiiliatomia. Esimerkiksi C18 hiililuvun omaavalla hiilivedyllä on 18 hiiliatomia [Pirnes 2010:16]

Nimike	KP °C	Nimike	KP °C
C18	316	C48	566
C19	330	C50	575
C20	344	C52	584
C21	356	C54	592
C22	369	C56	600
C23	380	C58	608
C24	391	C60	615
C25	402	C66	635
C26	412	C70	647
C28	431	C76	664
C30	449	C80	675
C32	466	C86	691
C34	481	C90	700
C36	496	C96	712
C38	509	C98	716
C40	522	C100	720
C42	534	C110	735
C44	545	C120	750
C46	556		

Mitä korkeampi on tislattavan aineen hiililuku, sitä korkeampi on kiehumispiste, tiheys ja viskositeetti. Taulukko 1:n tarkoituksena on selkeyttää hiililuvun mukaan tehdyn luokittelun perusteet tyhjötislattaessa raakaöljyjä [Pirnes, 2010:16]

Tyhjötislauskolonni on kooltaan leveämpi kuin normaali tislauskolonni. Tämä johtuu siitä, että käsiteltävien kaasujen tiheys on huomattavasti pienempi, kun paine on alhaisempi. Alipaine kolonnissa saadaan pääasiassa aikaan ylimenohöyryjä lauhduttamalla, mutta lisäksi apuna käytetään höyryejektoreita ja tyhjöpumppuja. Kolonnin alipaine tehdään tyhjölaitteiden avulla 9 kPa:n(a) ja 3 kPa:n(a) välille. Alipaineen parantaminen 1 kPa:n verran tyhjökolonnissa vaikuttaa kymmeniä asteita lämpötilassa [Kister 1992:4]. Kuvassa 7 on esitetty tyhjötislauskolonnin rakenne.



Kuva 7. Tyhjötislauskolonnin rakenne [ Vacuum distillation:17]

Tyhjökolonneissa käytetään yleensä metallilangoista kudottuja pakkauksia tai kiinteitä täytekappalepetejä (kuva 8, s.12) painehäviön minimoimiseksi kolonnin pohjan ja hui-pun välillä, koska niillä on huomattavasti pienempi painehäviö kuin samalla määrällä välipohjia. Tyhjötislauksessa käytetään yleensä myös vesihöyryä, varsinkin kun tislattava aine on vaikeasti haihtuvaa. Vesihöyryä syötetään kolonniin strippaushöyryksi haihduttamaan keveitä jakeita kolonnin pohjalta. Vesihöyrytislausta käsitellään kappaleessa 3.5. Tislauksen tarvitseman energian tyhjökolonne saa lämmitysuunista, jossa syöttö normaalisti lämmitetään 300 – 395 °C:een.

Täytekappaleet tyhjekolonnissa toimivat nesteen ja kaasun välisinä aineensiirtopintoina. Täytekappaleet jaetaan kahteen pääryhmään:

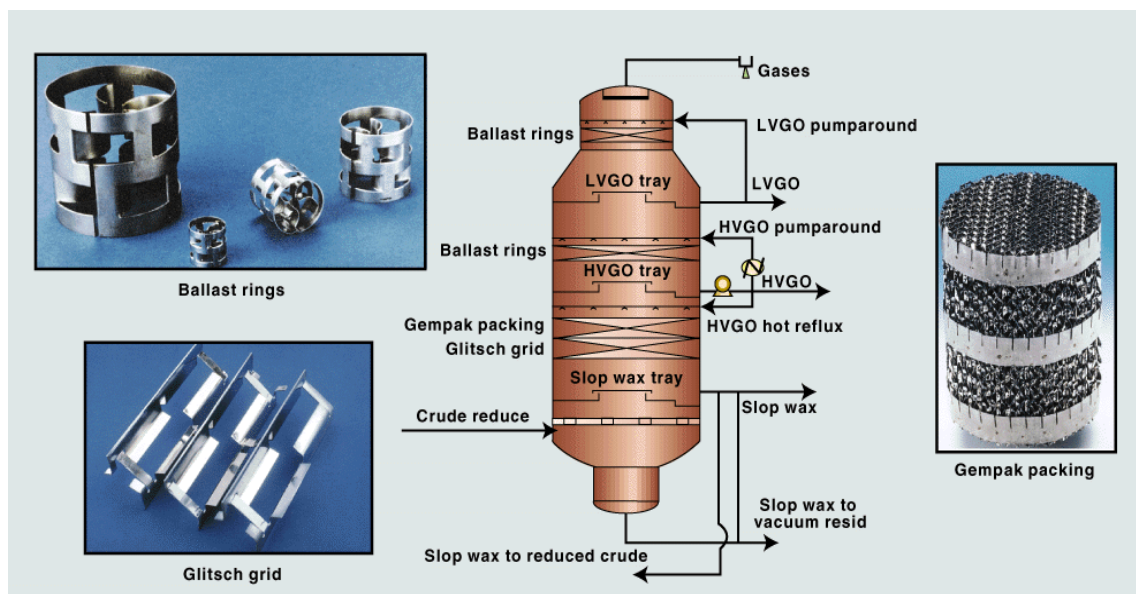
### 1. Irtotäytekappaleet

- Pallo-, rengas- ja satulamaiset täytekappaleet
- Yksittäisiä irtonaisia kappaleita
- Epäsäännöllisesti pakattuna kolonnissa

### 2. Systemaattisesti pakatut täytekappaleet

- Metallista, muovista tai keramiikasta valmistettu
- Säännöllinen rakenne
- Verkko- tai levyrakenteisia

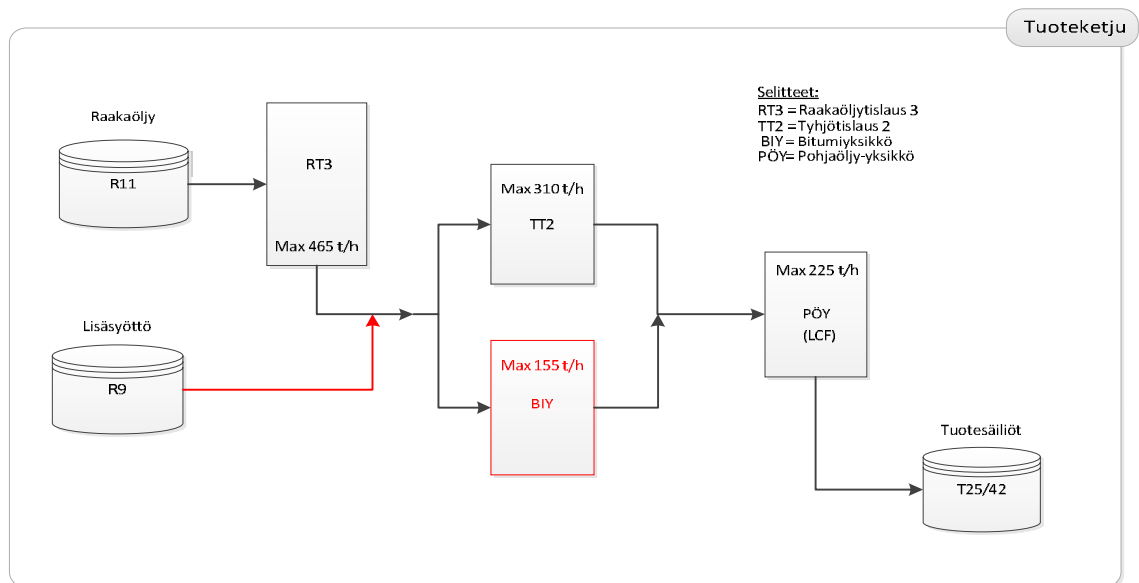
Kuvassa 8 on esitetty tyhjötislauskolonnin täytekappaleita ja niiden tyypillinen sijoitus kolonnissa.



Kuva 8. Tyhjötislauskolonnin täytekappaleet ja tyypillinen sijoitus kolonnissa

#### 4 Pohjaöljytuoteketju

Pohjaöljy on tisauskolonnin pohjalta ulosotettava raskain tuote. Porvoon jalostamolla pohjaöljyketju saa alkunsa tuotantolinja 3:lla sijaitsevan raakaöljyn tisauskolonnin pohjatuotteena. Pohjaöljy johdetaan jatkojalostukseen tuotantolinja 1:n (TL-1) ja tuotantolinja 2:n (TL-2) alueilla sijaitseviin tyhjötislausyksiköihin, joissa pohjaöljystä pyritään pääasiassa tislaamaan kevyitä tisleitä (Kake) ja raskaita tisleitä (Kart). Tyhjötislausyksiköistä pohjaöljy johdetaan syötöksi tuotantolinja 4:llä (TL-4) sijaitsevalle pohjaöljy-yksikölle, jossa pohjaöljy vedytetään, vetykrakataan ja tyhjötislataan vielä kertaalleen. Lopputuotteena VAC:n tyhjötislauskolonnista saadaan erittäin raskasta pohjaöljyä, josta on tuoteketjun aikana pyritty tislaamaan kaikki arvokkaammat jakeet jatkokäsittelyyn jalostamon muihin yksiköihin. Tässä työssä käsitellään tarkemmin TL-1:llä sijaitsevaa BIY- tyhjötislausyksikköä. Kuvassa 9 on esitetty Porvoon jalostamon pohjaöljytuoteketju kokonaisuudessaan raakaöljystä tuotteeksi.



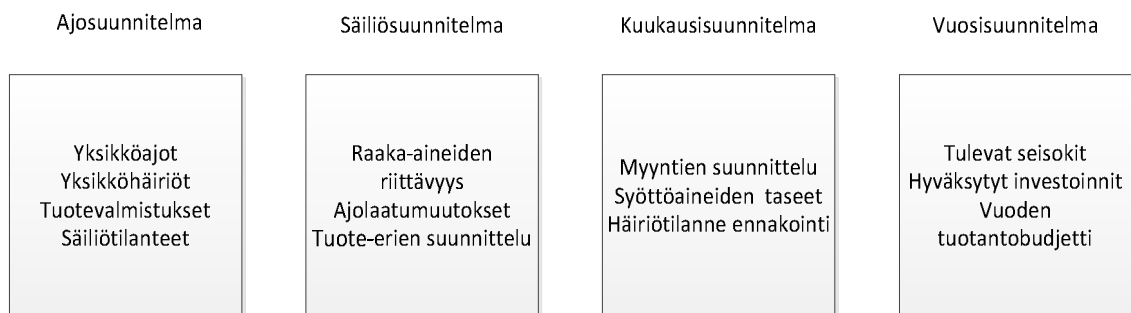
Kuva 9. Porvoon jalostamon pohjaöljyketju, jossa tarkasteltava bitumiyksikkö on merkitty punaisella

Pohjaöljyn hintataso on suhteellisen matala, ja tästä syystä pohjaöljyä jatko käsitellään tyhjötislauksessa ja krakkausyksiköissä. Raakaöljyn laadun valinta on suurin vaikuttava tekijä pohjaöljyn määrään. Porvoon jalostamolla noin 80 % raakaöljysyötöstä on venäläistä korkearikkistä Primorsk export blend (PEB) raakaöljyä ja raakaöljyn laatua muu-

tetaan vallitsevan markkinatilanteen mukaan sekoittamalla eri raakaöljyläatuja keskenään. Raakaöljyn laatumuutoksia tehdään lähes joka päivä.

Tuotannonsuunnittelu vastaa pohjaöljyketjun optimoinnista ja ajosuunnitelmista vallitsevan markkinatilanteen mukaan. Optimointi riippuu pääasiassa raakaöljyn ja tuotteiden markkinatilanteesta. Periaatteena on tehdä mahdollisimman halvoista syöttöaineista mahdollisimman hyviä tuotteita. Tuotannon suunnittelu ohjeistaa muuttamaan raakaöljyn laatua ja jalostamon ajomallia sen mukaan, mitä tuotteita halutaan valmistaa [Lahdenperä 2014:6].

Tuotannon suunnittelussa katsotaan kokonaisuutta jalostamolle tulevista ja lähtevistä virroista. Osana tätä tarvitaan tieto syöttöaineiden riittävydestä, tuotteiden ajotiloista ja linjauksista säiliöalueella. Pohjaöljyketjun tuotannon suunnittelussa huomioon otettavia tekijöitä ovat tuotesäiliöiden pinnat, pohjan sedimentti, häiriövarasäiliöt, raakaöljyn markkinatilanne, nopeat syöttöjen muutokset, ajolaatumuutokset, tuotantobudjetti ja yksikköhäiriöt. Kuvassa 10 on havainnollistettu tuotannon suunnittelun ajatusmallia ja toteutusta.



Kuva 10. Tuotannon suunnittelun ajatusmalli pohjaöljyketjun optimointiin

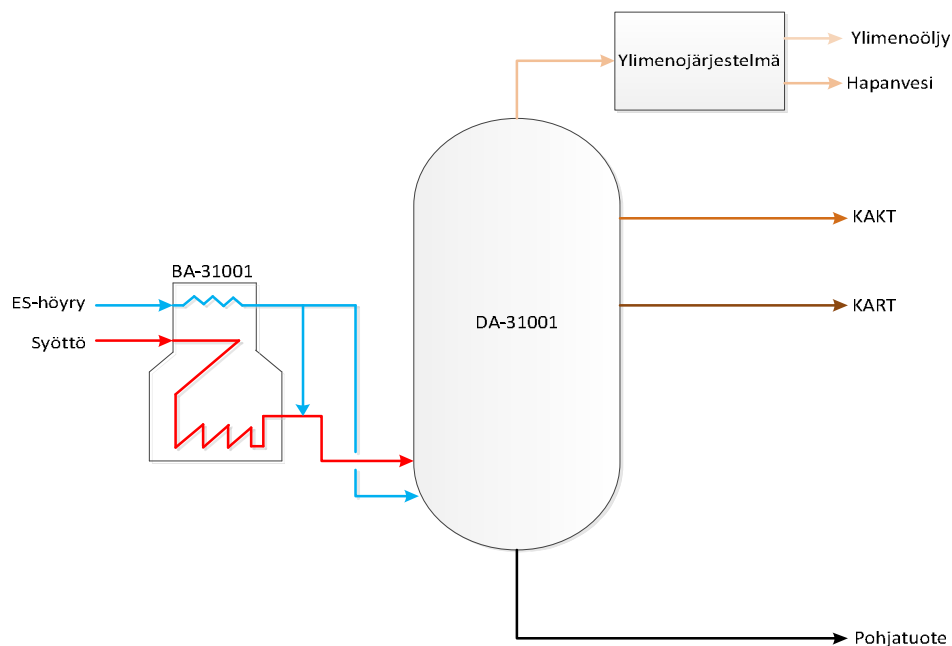
Tuotannonsuunnittelu käy yksityiskohtaisesti yksiköiden ajosuunnitelmat läpi. Myyntiennusteiden, jalostuskapasiteetin ja raaka-aineiden saatavuuden perusteella tehdään vuosittainen tuotantos suunnitelma, jota tarkennetaan vallitsevan tilanteen mukaan kuukausitason ja viikkotason suunnitelmiin. Viikkosuunnitelmassa käydään läpi päivittäiset ajo-ohjelmat ja säiliöiden käyttösuunnitelma. Ajo-ohjelmaan on määritetty tietyt raja-alueet tuotteiden ja syöttöjen määriin. Ajo-ohjelma toteutetaan prosessiyksiköitä operoimalla huomioiden käytönvalvojen määrittelemät rajoitteet. Päivittäiset ajo-ohjelmat toimitetaan jalostamon vuoropäälliköille. Vuoropäälliköt vastaavat siitä, että päivittäistä

ajosuunnitelmaa toteutetaan vuoroissa [Tamminen, 2014:7]. Seurantaan käytetään PROMAX laskentatyökalua, jonka avulla seurataan ja suunnitellaan tulevaa toteumaa kuukausittain.

Raaka-aineiden hankinnassa tuotannon suunnittelulla on käytössä excel laskentaohjelmaan pohjautuva raakaöljy "solver", jonka avulla voidaan simuloida laskemalla, paljonko tietystä raakaöljyalaadusta tonnia kohden on mahdollista saada eri tuotejakeita. Laskettuja arvoja vasten pyritään optimoimaan jalostusprosessia siten, että saadut tuotejaemäärät vastaavat likimain laskettuja arvoja [Lahdenperä 2014:6]

## 5 Bitumi-yksikkö

Bitumiyksikkö (BIY) on osa Porvoon jalostamon pohjaöljyketjua ja se sijaitsee tuotantolinja 1:n alueella (ks. kuva 9, s.13). Yksikkö käynnistettiin vuonna 1988. Yksikköä käytetään pohjaöljyn tislaukseen tyhjötislausyksikkö 2:n rinnalla (kuva 9, s.13). Yksikössä on tyhjötislauskolonni, jossa tislaukseen suoritetaan alipaineessa (n. 3 kPa(a)). Yksikön tyhjötislauskolonnista saatavat tuotteet ovat ylimenoöljy, kevyt tisle (Kake), raskas tisle (Kart) ja pohjaöljy (ÖP). Kuvassa 11 on esitetty tyhjötislauskolonni yksinkertaisessa muodossa.



Kuva 11. Tyhjötislauskolonni oheislaitteineen

Syöttö kuumennetaan lämmitysuunilla BA-31001, josta se jatkaa matkaa tyhjötislauskolonniin DA-31001. Kolonnissa erotetaan voimakkaassa alipaineessa tislaamalla helpommin haihtuvat hiilivedyt raskaasta pohjatuotteesta. Kolonnin alipaine luodaan ylimenojärjestelmässä, ja lisäksi kolonnin pohjalle syötetään strippaushöyryä haihduttamaan keveitä jakeita pohjalta. Kolonnista saatavat tuotteet jatkavat matkaa jatkojalostettaviksi jalostamon muihin prosessiyksiköihin.

## 5.1 Syötöt ja tuotteet

Tässä luvussa käsitellään bitumiyksikön syötön ja tuotteiden ominaisuuksia.

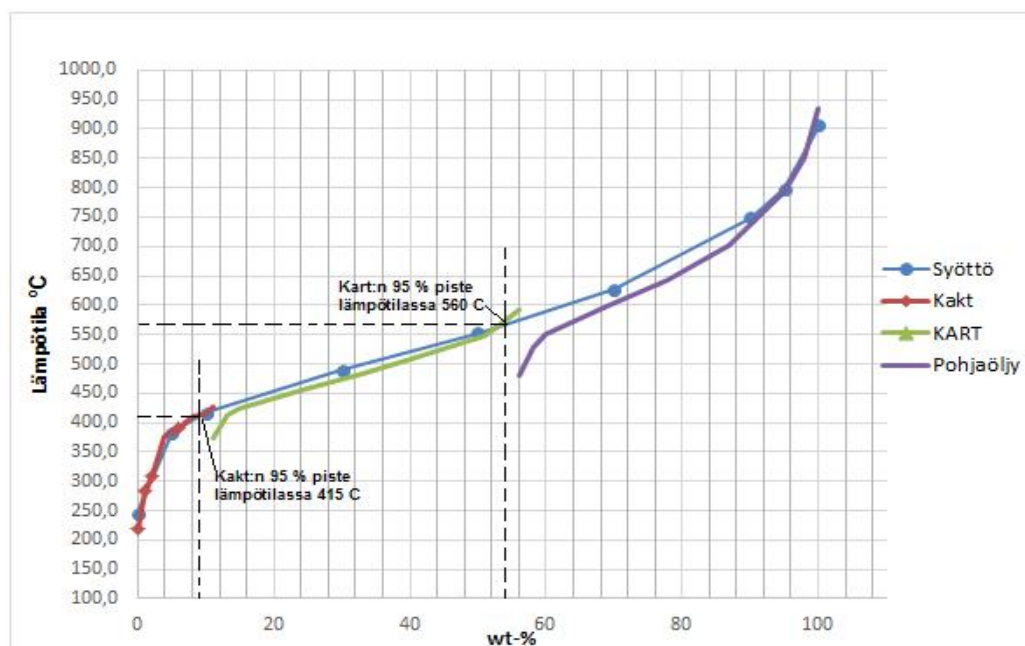
### 5.1.1 Syötöt

Bitumiyksikön (BIY) syöttönä on pääasiassa raakaöljytislaus 3:n (RT3) pohjaöljy. Suunnittelusyöttö yksikköön on 155 t/h ja syötön lämpötila 90 °C. Yksikköön ei suositella krakattuja syöttöjä. Krakkauksessa katkaistaan pitkiä hiilivetyketjuja, ja näin syntyy kaksoissidoksen omaavia hiilivetyjä, joita kutsutaan olefiineiksi. Tyhjötislauskolonnin välipohjia ei ole suunniteltu syötölle, joka sisältää olefiineja (tukkii täyttekappalepetejä). Taulukossa 2 on esitetty tyypillinen bitumiyksikön syötön koostumus ja tislausalue.

Taulukko 2. Bitumiyksikön syötön tyypillinen koostumus, jossa TISGC-E560= Kart:n määrä syötössä, TISGC-E420= Kakt:n määrä syötössä ja SIMDISGC 0-100= Syötön tislausalue.

LEIM-PM	°C	176	} C23...>C100
TIHEYS	kg/m <sup>3</sup>	934	
RIKKI-XRF	wt-%	2,27	
TISGC-E560	wt-%	56	
TISGC-E420	wt-%	11,6	
SIMDISGC-0	°C	308	
SIMDISGC-5	°C	389	
SIMDISGC-10	°C	419	
SIMDISGC-30	°C	492	
SIMDISGC-50	°C	554	
SIMDISGC-70	°C	628	
SIMDISGC-90	°C	749	
SIMDISGC-95	°C	799	
SIMDISGC-100	°C	907	

Tavoitteena on saada tasalaatuista pohjaöljysyöttöä bitumiyksikköön (BIY), mutta raakaöljyn laatu muuttuu useasti pohjaöljyketjun ajosuunnitelmien mukaisesti, ja näin ollen bitumiyksikön (BIY) syötön laatu vaihtelee. Suurimpina tekijöinä BIY:n syötön laatuun vaikuttavat RT3:n esitislauksen toiminta ja jalostamon raakaöljyلاادun valinta. Syötön laadun seuranta varten BIY:n syötöstä analysoidaan tislausalue ja kevyempien jakeiden (kart ja kakt) osuus kokonaismäärästä (taulukko 2). Raskaan ja kevyen kaasuöljyn leikkauspisteiksi on määritetty lämpötilat 560 °C ja 415 °C. Kuvassa 12 on esitetty bitumiyksikön syötön tislauskäyrä ja sen sisältämien jakeiden tislausalueet.



Kuva 12. Bitumiyksikön syötön tislauskäyrä ja sen sisältämien jakeiden kiehumisalueet

### 5.1.2 Tuotteet

Yksikön tuotteita ovat pohjaöljy (ÖP), raskas kaasuöljy (Kart) ja kevyt kaasuöljy (Kakt) (ks. taulukot 3 ja 4). Pääasiassa kuitenkin tuotteet jakautuvat pohjaöljyn ja kart:n kesken, koska kakt- jae palautetaan lähes kokonaisuudessaan kolonniin ja kakt- jakeen ulosotto ajetaan normaalisti kart- jakeen sekaan. Tuotteiden laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat raakaöljytislaus 3:een (RT3) syötetyn raakaöljyn laatu, tyhjän tehokkuus kolonnissa DA31001, strippaushöyryn lämpötila ja määrä, kiertopalautukset, kolonnin syötön lämpötila ja viimeisimpänä pohjaöljyketjun ajosuunnitelmat.



Taulukko 3. Pohjaöljyn laboratorioanalyysit ja tyypillinen koostumus, jossa TISGC-E560= Kart:n määrä pohjaöljyssä ja SIMDISGC 0-100= Pohjaöljyn tislausalue

VISKO135°C	mm <sup>2</sup> /s	181,4
TISGC-E560	wt-%	18,9
RIKKI-XRF	wt-%	2,7
TIHEYS	kg/m <sup>3</sup>	905
SIMDISGC-0	°C	462,0
SIMDISGC-5	°C	510,0
SIMDISGC-10	°C	530,0
SIMDISGC-30	°C	581,0
SIMDISGC-50	°C	630,0
SIMDISGC-70	°C	693,0
SIMDISGC-90	°C	789,0
SIMDISGC-95	°C	841,0
SIMDISGC-100	°C	932,0

Taulukko 4. Kart- jakeen laboratorioanalyysit ja tyypillinen koostumus, jossa TISGC-E560= Tislautunut kart:n määrä lämpötilassa 560 °C, TISGC-R480= Tislautunut kart:n määrä lämpötilassa 480 °C, VANAD+NIKKELI= Metallien määrä kart-jakeessa ja TISGC 0-100= Kart:n tislausalue

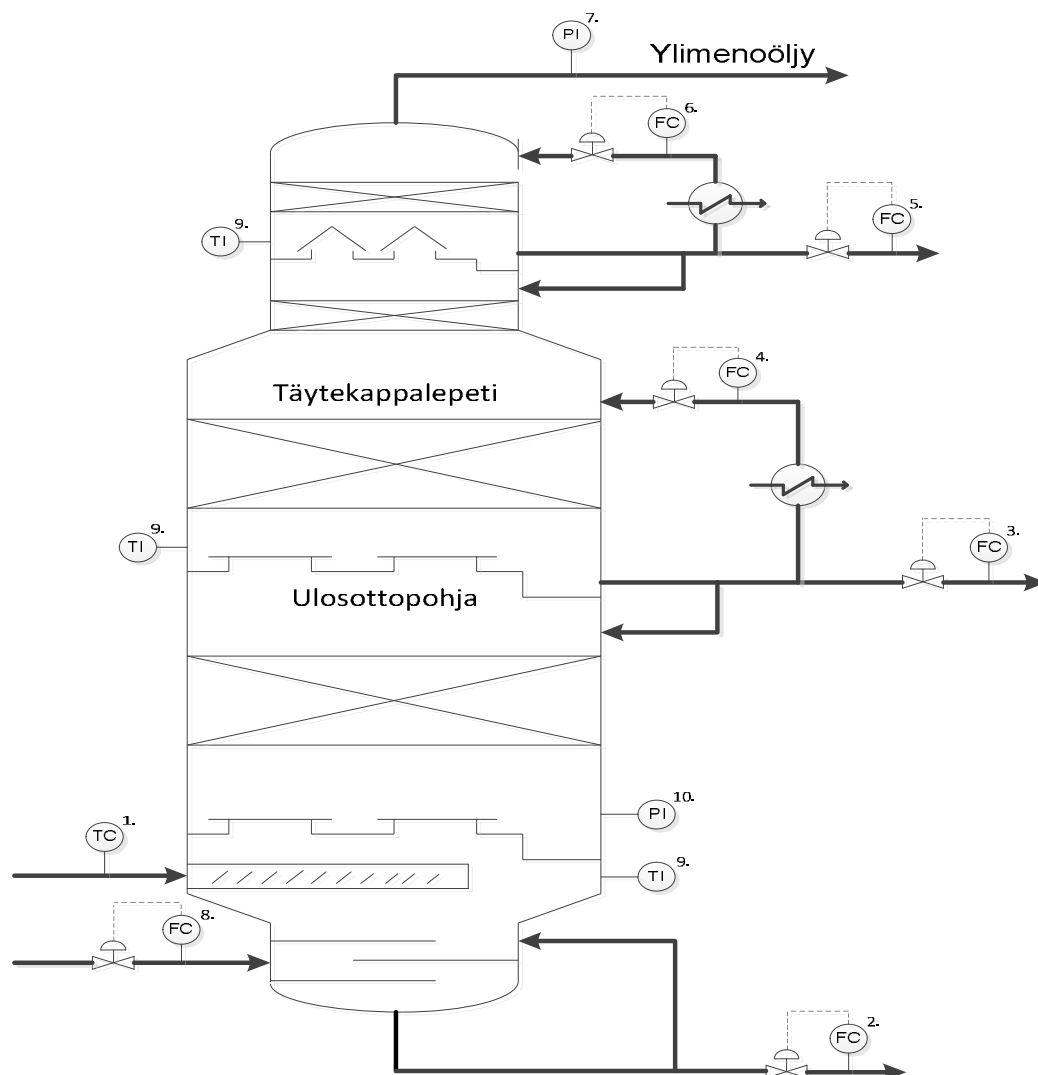
TISGC-E 560	wt-%	95,3
TISGC-R480	wt-%	44,7
TIHEYS	kg/m <sup>3</sup>	757,0
VANAD+NIKKELI	mg/kg	1,6
TISGC-0	°C	338,0
TISGC-5	°C	379,0
TISGC-10	°C	397,0
TISGC-30	°C	438,0
TISGC-50	°C	467,0
TISGC-70	°C	496,0
TISGC-90	°C	539,0
TISGC-95	°C	560,0
TISGC-100	°C	602,0

Pohjatuotteen näytteenotto on aikataulutettu siten, että pohjatuote analysoidaan 2 kertaa viikossa. Pohjaöljyn laboratorioanalyysin tärkein seurattava analyysi on TISGC-E560, joka kertoo kart:n määrän massaprosentteina pohjatuotteessa. Kart p-% ylärajaksi on asetettu 21 p-%. Mitä vähemmän kart:a pohjaöljyssä on, sitä enemmän tuotantolinja 4:llä (TL-4) sijaitseva LCF-yksikkö saa raskaampaa pohjaöljysyöttöä.

Kart- jakeen näytteet on aikataulutettu haettavaksi kaksi kertaa viikossa. Tärkeimpiä seurattavia analyyskejä ovat metallit kart:ssa ja kart:n leikkauksen lämpötila 560 °C (TBP 95-%). Kart- jakeen metallipitoisuuksien laaturajaksi on määritetty 0,6-2,0 mg/kg [Oili laboratoriojärjestelmä: 13].

## 5.2 Tyhjötislauskolonni DA-31001

Tyhjötislauskolonni DA-31001 (kuva 13) oheislaitteineen on bitumiyksikön tärkein kokonaisuus. Kolonnissa erotetaan tislaamalla voimakkaassa alipaineessa pohjaöljyisyyden sisältämät jakeet jatkojalostettaviksi. Kuvan 13 selitteet on koottu taulukkoon 5 sivulla 20.



Kuva 13. Tyhjötislauskolonni DA-31001 ja tärkeimmät operointimuuttujat

Taulukko 5. Selitteet kolonnissa DA-31001 oleville muuttujille (ks. kuva 12, s.19)

Nro	Muuttuja	Selitys	Tarkoitus
1	Lämpötila	Syötön lämpötilan nostaminen/laskeminen	Säädettävä
2	Virtaus	Pohjatuote varastoon	Säädettävä
3	Virtaus	KART-tuote varastoon	Säädettävä
4	Virtaus	KART-kiertopalautus	säädettävä
5	Virtaus	KAKT-tuote varastoon	Säädettävä
6	Virtaus	KAKT-kiertopalautus	Säädettävä
7	Paine	Kolonnin huipun paine	Mittaus
8	Virtaus	Strippaushöyry kolonniin	Säädettävä
9	Lämpötila	Kolonnin lämpömittaus pisteitä	Mittaus
10	Paine	Kolonnin pohjan paine	Mittaus

Kolonne sisältää neljä täytekappalepetiä, joista alin ja toiseksi ylin peti on tehty gempaklevyistä. Kaksi muuta petiä ovat ballast metallirenkaita. Petien alla on eräänlaisia rutilöitä, joita kutsutaan Grid-kerroksiksi. Jokaisella pedillä on huuhtelujärjestelmä, josta huuhtelu jaetaan pedin poikkipinnalle suutinputkistolla, poikkeuksena toiseksi ylimmällä pedillä huuhtelu on toteutettu painovoimaisella nestejakajalla. Esilämmitysuunin tulistimelta tuleva strippaushöyry (ES-höyry) syötetään höyryn syötönjakajan kautta venttiilivälipohjien alle [Kurvinen, 2015:9]. Kolonnin pohjalla kierrätetään lisäksi pohjatuotetta alaosan jäädyttämiseksi ja krakkauksen minimoimiseksi [Kurvinen 2015:9].

Tyhjötislauskolonne saa syöttönsä n. 370 – 390 °C:n lämpötilassa uunilta BA-31001, josta se johdetaan siirtolinjaa pitkin kolonnin alaosassa sijaitsevaan syötönjakajaan. Nykyisellä syöttötasolla noin 20 p-% hiilivedyistä höyrystyy siirtolinjassa ennen kolonnia. Syötönjakaja kolonnin sisällä on puolikuun muotoinen, ja sen tehtävä on jakaa syöttö tasaisesti kolonnin sisäpinta-alalle. Siirtolinjaan johdetaan tasavirtauksella 0,6 t/h höyryä riittävän virtausnopeuden takaamiseksi. Kolonnin huipun suunnittelupaine on 5,5 kPa(a) ja huipun lämpötila on 55 °C [Kurvinen, 2015:9].

Kolonnin syöttöosan alapuolelle johdetaan strippaushöyryä (ES-höyry), tarkoituksena on laskea syöttöaineen kiehumispistettä ja parantaa keveiden hiilivetyjen haihtumista pohjatuotteesta. Strippaushöyry ajaa samaa ideaa kolonnissa kuin tyhjö, eli se laskee syöttöaineen kiehumispistettä. Liian suuri strippaushöyry määrä kolonnissa aiheuttaa painehäviötä, jolloin tilavuusvirta kolonnissa kasvaa, ja näin ollen alipaine heikkenee.

Höyrymäärän kasvu kuormittaa myös vakuumijärjestelmää, jolloin ylimenosäiliö kuormittuu enemmän lauhtuvista kaasuista. Strippaushöyryn lasku parantaa vakuumia ja heikentää keveiden tuotesaantoa, koska tilavuusvirta kolonnissa pienenee. Ohjearvoina strippaushöyryn määrä kolonniin on 2 - 3,6 t/h tilanteen mukaan. Taulukkoon 6 on koottu bitumiyksikön tyhjötislauskolonnin suunnittelu-arvot.

Taulukko 6. DA-31001:en suunnittelu-arvot

Operointipaine	kPa	-94,5
Suunnittelupaine (MAX/MIN)	kPa	99 / -100
Testipaine	kPa	117
Operointilämpötila (Top/Bottom)	C	80 / 405
Suunnittelulämpötila (Top/Bottom)	C	100 / 420
Kapasiteetti	m <sup>3</sup>	570

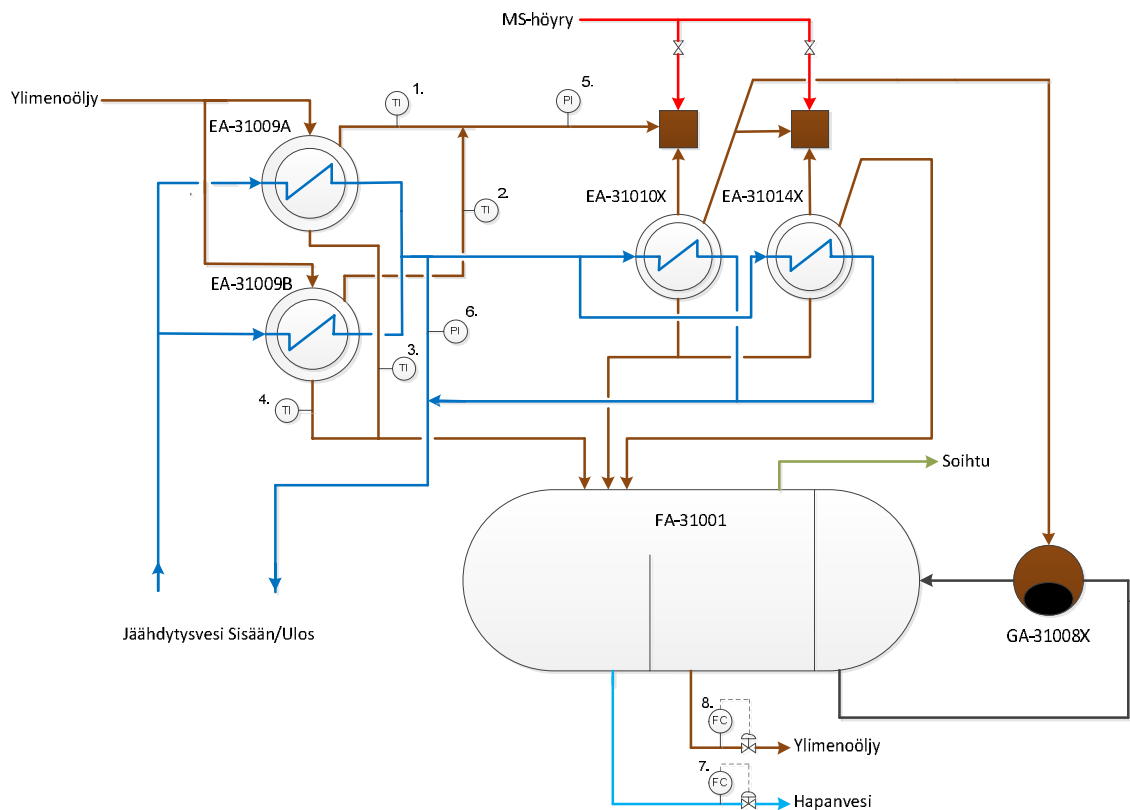
### 5.3 Ylimenojärjestelmä

Tyhjötislauskolonniin kuuluu kaksi rinnakkaista ylimenolauhdutinta EA31009 A/B. Ylimenokaasut johdetaan tyhjäkolonnista näille lauhduttimille, ja niissä muodostuu kolonnin alipaine. Ylimenojärjestelmässä on kaksi ejektoria, vesirengaspumppu ja ejektorilauhduttimet. Tyhjän imemiseen ja ylläpitämiseen käytetään käynnin aikana yhtä ejektoria ja vesirengaspumppua [Kurvinen 2015:9]. Toinen ejektori ja lauhdutin EA31014X on pienempitehoinen ja toimii vesirengaspumpun varalaitteena. Ejektorit toimivat 16 bar(g):n höyryllä. Taulukossa 7 on esitetty ylimenovaihtimien suunnittelu-arvot.

Taulukko 7. EA-31009A/B suunnittelu-arvot

	IN / OUT Tuubipuoli	IN / OUT Vaippapuoli
Virtaava aine	Jäähdytysvesi	Ylimenoöljy
Vesi kg/s		/ 1,70
Neste kg/s	153 / 153	/ 0,35
Höyry kg/s		1,87 / 0,17
Lämpötila °C	19 / 26	80 / 30
Paine kPa(abs)	900	5,5
Virtausnopeus m/s (max)	1,2	62
Suunnittelupaine kPa(abs)	1200	550
Suun.lämpötila °C	50	100

Ylimenovaihtimilta lauhtumattomat kaasut johdetaan ejektorilla ejektorilauhduttimelle EA31010X, ja vielä siinä lauhtumattomiksi kaasuiksi jäävät johdetaan vesirengaspumpulle GA31008X. Ejektorilauhduttimista valuva neste johdetaan ylimenosäiliöön FA31001. Säiliön tarkoituksena on erottaa vesi, öljy ja kaasu. Säiliöön kertyvä vesi pumpataan hapanvesiyksikköön (HVY), öljy johdetaan kaasuöljyn rikinpoistoyksikköön (KARP3) ja kaasut johdetaan pisananerottimen kautta ylimenokaasujen pesurille (YKP). Kaasujen vaihtoehtoinen ajopaikka on soihdunjärjestelmä (SKTO) [Kurvinen 2015:9]. Kuvassa 14 on esitetty tyhjötislauskolonnin DA-31001 ylimenojärjestelmä.



Kuva 14. Ylimenojärjestelmä ja tärkeimmät operointimuuttujat

Taulukkoon 8 (ks. s.23) on koottu ylimenojärjestelmässä olevat operointimuuttujat. Tarkoituksena on selvittää kuvassa 14 esitettyjä muuttujia ylimenojärjestelmästä.

Taulukko 8. Selitteet ylimenojärjestelmässä oleville muuttujille

Nro	Muuttuja	Selitys	Tarkoitus
1	Lämpötila	EA-31009A ylimenokaasu	Mittaus
2	Lämpötila	EA-31009B ylimenokaasu	Mittaus
3	Lämpötila	EA-31009A lauhtuneet kaasut	Mittaus
4	Lämpötila	EA-31009B lauhtuneet kaasut	Mittaus
5	Paine	Ylimenokaasut	Mittaus
6	Paine	Jäähdytysvesi	Mittaus
7	Virtaus	Hapanvesi	Säädettävä
8	Virtaus	Ylimenoöljy	Säädettävä

#### 5.4 Tyhjäkolonnin DA-31001 paine

Tyhjötislauskolonnin alipaine on kolonnin toiminnan kannalta tärkeimpiä muuttujia. Suurimpina rajoitteina alipaineeseen ovat ylimenokaasujen määrä ylimenojärjestelmässä ja ylimenovaihtimien jäähdytysveden lämpötila. Keskimääräinen paine tyhjäkolonnissa DA-31001 oli noin 4 kPa(a) vuonna 2014. Ylimenokaasut voidaan luokitella kahteen ryhmään:

- Lauhtumattomat kaasut
  - Ilmavuodot
  - Krakkaustuotteet
- Lauhtuvat kaasut
  - Vesihöyry
  - Kondensoituvat hiilivedyt

Taulukossa 9 on esitetty tyhjötislauskolonnin (DA-31001) ylimenokaasujen koostumus huipun paineen ollessa 5,5 kPa(a).

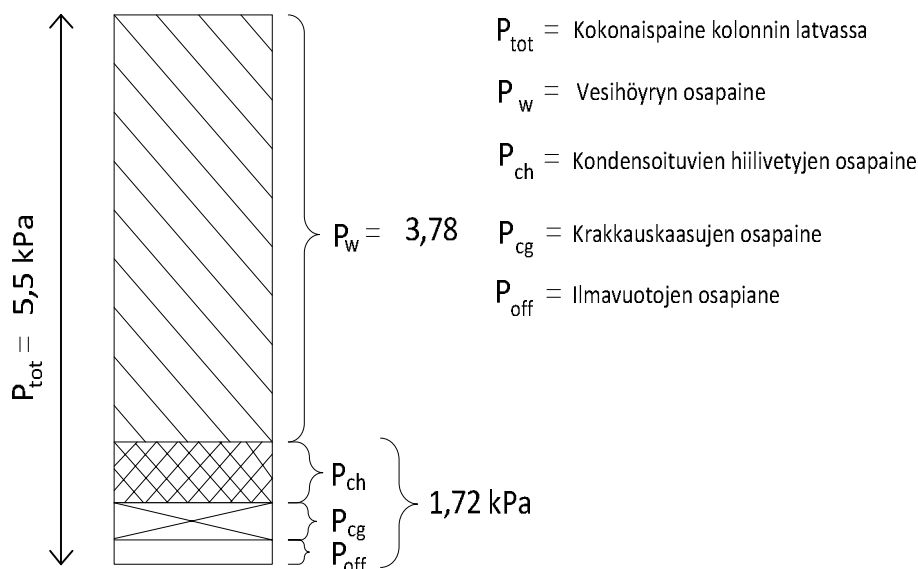
Taulukko 9. DA-31001 ylimenokaasujen koostumus 5,5 kPa(a):n paineessa

Komponentti	Mooliosuus	Osapaine(kPa)
H <sub>2</sub> O	0,68629	3,7746
H <sub>2</sub> S	0,04929	0,2711
H <sub>2</sub>	0,01302	0,0716
N <sub>2</sub>	0,06729	0,3701
C <sub>1</sub>	0,04091	0,2250
C <sub>2</sub>	0,02051	0,1128
C <sub>3</sub>	0,01815	0,0998
NC <sub>4</sub>	0,00451	0,0248
NC <sub>5</sub>	0,00725	0,0399
Muut	0,09280	0,5104
Yhteensä	1	5,5

Lauhtumattomia kaasuja esiintyy ylimenojärjestelmässä useasta syystä. Yleisimpänä syynä ovat ilmavuodot kolonnissa. Lisäksi venttiilit, laipat ja putkistot aiheuttavat ilmavuotoja. Krakkaustuotteiden yleisin lähde on tyhjäkolonnin uuni BA-31001, jossa raskaat hiilivedyt alkavat hajota kuumuuden johdosta ja kulkeutuvat ylimenojärjestelmään.

Kondensoituvista hiilivedyistä ja vesihöyrystä suurin osa lauhtuu ylimenovaihtimilla. Vesihöyryn lähteinä ovat uuniin BA-31001 syötettävät tuubihöyryt, siirtolinjahöyry ja kolonniin DA-31001 syötettävä strippaushöyry [Sushil, 2014:14].

Kolonnin minimipaine koostuu taulukossa 9 mainittujen komponenttien osapaineiden summasta eli kokonaispaineesta ylimenojärjestelmässä. Kuvan 15 tarkoituksena on selkeyttää komponenttien osapaineiden suhdetta kokonaispaineeseen kolonnin latvassa.



Kuva 15. Komponenttien osapaineet kolonnin latvan paineen ejektoreilla olessa 5,5 kPa

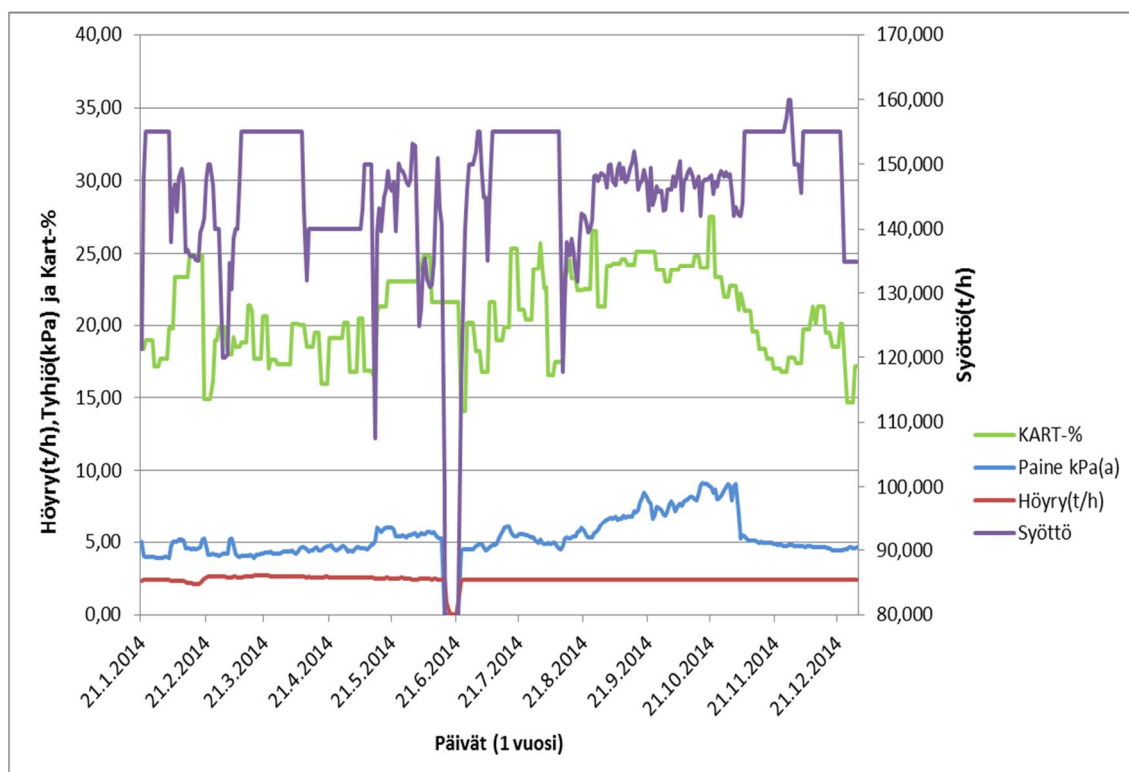
Kuvasta 15 nähdään, että vesihöyryn osapaineen osuus kolonnin huipun kokonaispaineesta on suuri. Kolonnin teoreettinen minimipaine koostuu kondensoituvien hiilivetyjen, kraukkauskaasujen ja ilmavuotojen kokonaispaineesta. Paineen 1,72 kPa alle ei ole mahdollista päästä tässä tapauksessa. Strippaushöyryn määrällä on siis suurin vaikutus kolonnin latvan paineeseen, ja siihen on mahdollisuus vaikuttaa. Näin ollen keskityttiin simuloinnissa kolonnin strippaushöyryn määrän vaikutuksiin kolonnissa DA-31001.

## 6 Simuloinnin lähtökohdat

Strippaushöyryjen simulointia varten oli syytä tarkastella tarkemmin kolonnin painetason vaihtelua ja strippaushöyryn syöttömääriä vuositasolla, koska nämä kaksi muuttujaa vaikuttavat tyhjötislauskolonnin toimintaan ja tuotesaantoihin huomattavasti. Tyhjötislauskolonniin syötettävää strippaushöyryä on pidetty vakiovirtausmäärällä useiden vuosien ajan. Toisaalta saatavilla ei ole ollut tietoa siitä, millä tavalla strippaushöyrymäärän kasvattaminen tai pienentäminen vaikuttaa kolonnin erotuskykyyn. Nykyinen strippaushöyryn virtausmäärä on ollut tarvittavalla tasolla tuotteiden laatuvaatimuksiin nähden. Oli kuitenkin syytä selvittää simuloinnin avulla strippaushöyryn ajomäärät, jotta



tulevaisuudessa strippaushöyryä olisi mahdollista operoida kolonnissa vallitsevien olosuhteiden mukaan, ja sitä kautta mahdollistaa kustannustehokkaampaa operointia. Näiden lähtökohtien perusteella strippaushöyryn määrä, kolonnin huipun paine ja pohjan kart-% koottiin kuvaan 16, käyttäen Neste Oilin TOP-järjestelmää. Järjestelmän tarkoituksena on kerätä prosessidatahistoriaa. Kuvassa 16 esitetty data on kerätty päiväkeskiarvona.

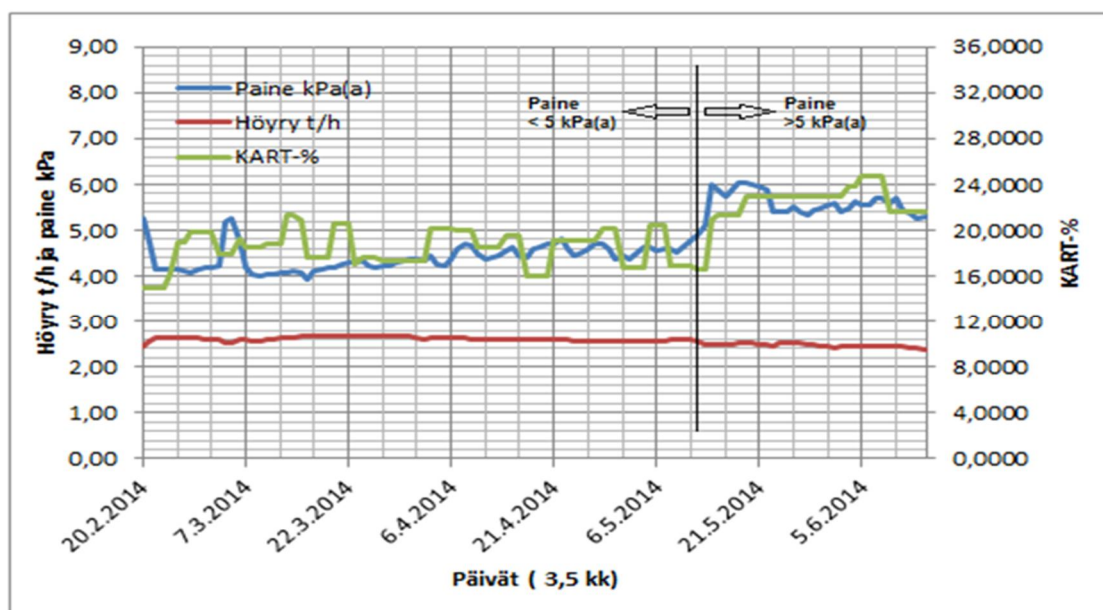


Kuva 16. Kolonnin paine, strippaushöyryn määrä, syötön määrä ja kart-% vuoden ajalta.

Tarkasteltaessa kuvaa 16 on huomioitavaa, että kolonnin painetaso ja kart-% ovat vaihdelleet vuositasonla huomattavasti. Muutoksiin ei ole vastattu operoimalla strippaushöyryä. Tämän perusteella oli tärkeää selvittää strippaushöyryjen vaikutukset kolonnissa DA-31001 simuloimalla, jotta tulevaisuudessa on mahdollista suorittaa koeajot ja operoida strippaushöyryä optimaaliselle tasolle kolonnin olosuhteiden muuttuessa.

Alle 5 kPa(a):n painetasoilla raskaan kaasuöljyn (kart) p-% pohjatuotteessa on ollut hyvä (<21 p-%), ja yli 5 kPa(a):n painetasoilla se on huonontunut selkeästi (Kuva 17). 5 kPa:n painetasoa kolonnin huipussa voidaan pitää keskiarvona tarkasteltaessa strip-

paushöyryn vaikutuksia pohjatuotteen kart:n p-%:iin. Kuvan 17 tarkoituksena on selvittää kolonnin paineen muutoksen vaikutusta pohjatuotteen kart:n p-%:iin.



Kuva 17. Kolonnin paine, strippaushöyrymäärä ja kart-% ajankohdalta jolloin paine kolonnissa on noussut.

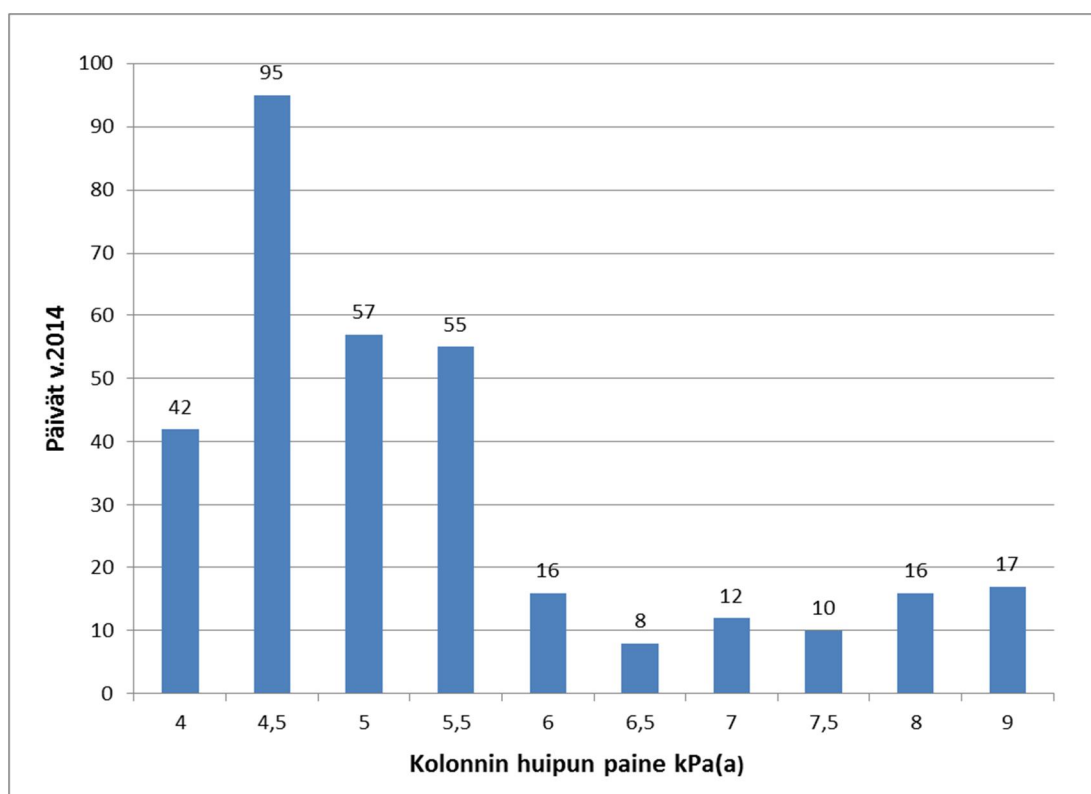
## 7 Simulointi

Strippaushöyryn muutoksien vaikutus selvitettiin simuloimalla käyttäen Aspen plus ohjelmistoa. Tarkoituksena oli selvittää strippaushöyrysyötön muutoksien vaikutuksia kolonnin DA-31001 tuotteisiin (ks. Kohta 5.1, s.17-18). Simuloinneissa käytettiin eri strippaushöyryn syöttömääriä eri painetasoilla. Simuloinnissa painetaso muutettiin manuaalisesti, ja simulointi suoritettiin valituilla painetasoilla vaihtelemalla strippaushöyryn syöttömäärää.

Kuten sivulla 25 on todettu, strippaushöyryn osapaineen vaikutus kolonnin latvan kokonaispaineeseen on merkittävä, joten simulointia varten selvitettiin kolonnin latvan paine päiväkeskiarvolla v. 2014 (Kuva 18, s.28), ja sen perusteella valittiin simuloinneissa käytetyt painetasot.

## 7.1 Painetasojen valinta simulointiin

Kolonnin painetason vaihtelu vuositasolla lukumääräisesti on laaja, simulointien määrä olisi kasvanut mahdottomaksi. Tarkoituksena oli laskea päivät vuositasolla tietyillä painetasoilla. Esimerkkinä, painetasot 3,75 kPa(a) ja 4,25 kPa(a) yhdistettiin painetasoksi 4 kPa(a), ja näin saatiin päivien lukumääräksi tälle painetasovälille 42 päivää. Jokainen simulointiin valittu painetaso on valittu samalla periaatteella. Painetasot kolonnin huipussa ja päivien lukumäärä vuonna 2014 on annettu kuvassa 18.



Kuva 18. Kolonnin huipun paine ja päivien lukumäärä v. 2014

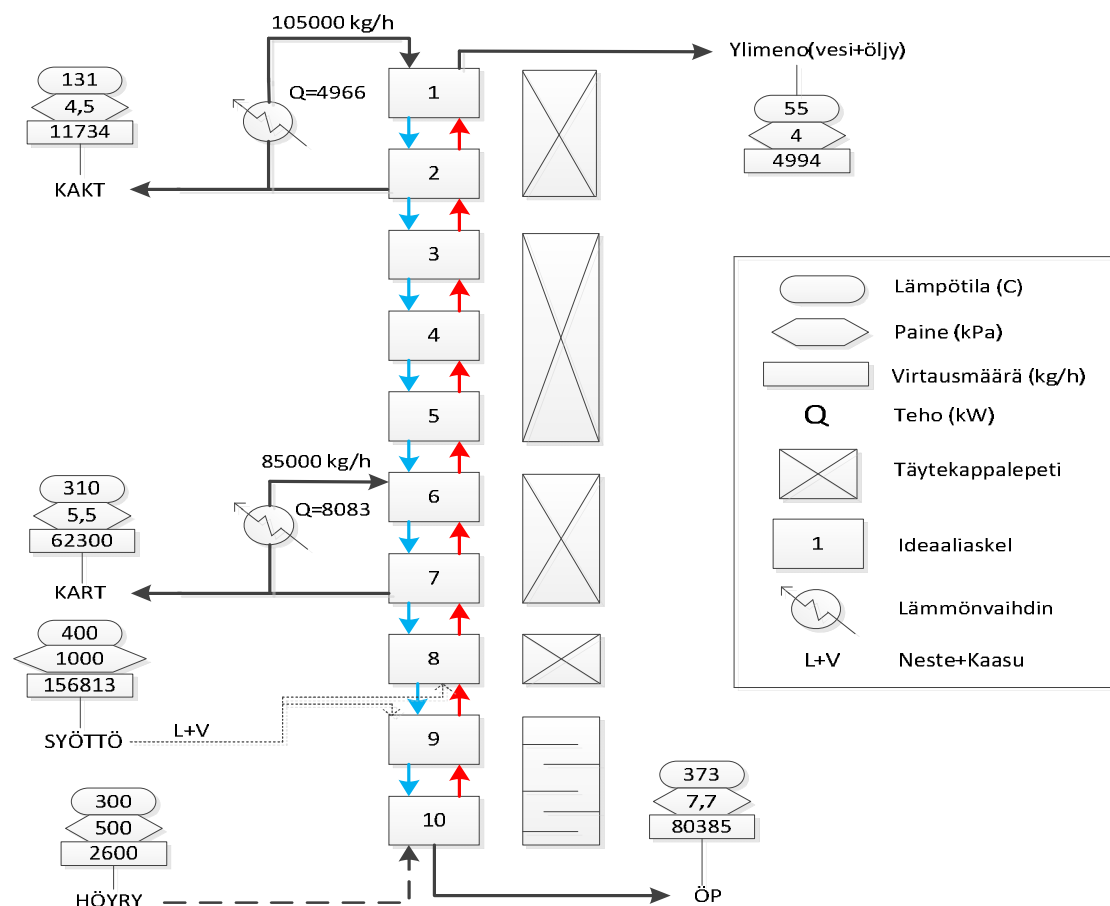
Kuvasta 18 nähdään, että teoreettisten simulointien määrä olisi ollut 10, mutta hallitseva painetaso kolonnissa on vuositasolla 3 – 7 kPa(a). Painetasot >7 kPa eliminoidiin pois simuloinneista. Tehtiin useita simulointeja valituilla painetasoilla muuttamalla strip-paushöyryn määrää kolonnissa DA-31001.

## 7.2 Strippaushöyrymäärän valinta simulointiin

Strippaushöyrymäärä valittiin simulointiin kolonnin suunnitteluarvojen mukaisesti välille 2 t/h-3,6 t/h. Simulointimalli on rakennettu syöttötasolle 170 t/h, joten strippaushöyrymäärä skaalattiin simulointien jälkeen vastaamaan bitumiyksikön todellista 155 t/h:n syöttötasoa, välille 1,8 t/h – 3,3 t/h.

## 7.3 Simulaattori

Simuloinnit suoritettiin Neste Jacobsin valmistamalla mallilla tyhjötislauskolonnista DA-31001. Kuvassa 19 on esitetty malli simuloitaessa 4 kPa(a):n paineessa, strippaushöyrymäärällä 2,6 t/h. Simuloinnit suoritettiin esimerkin mukaisesti vaiheittain valituilla painetasoilla sekä muuttamalla strippaushöyrysyötön määrää kolonnissa.

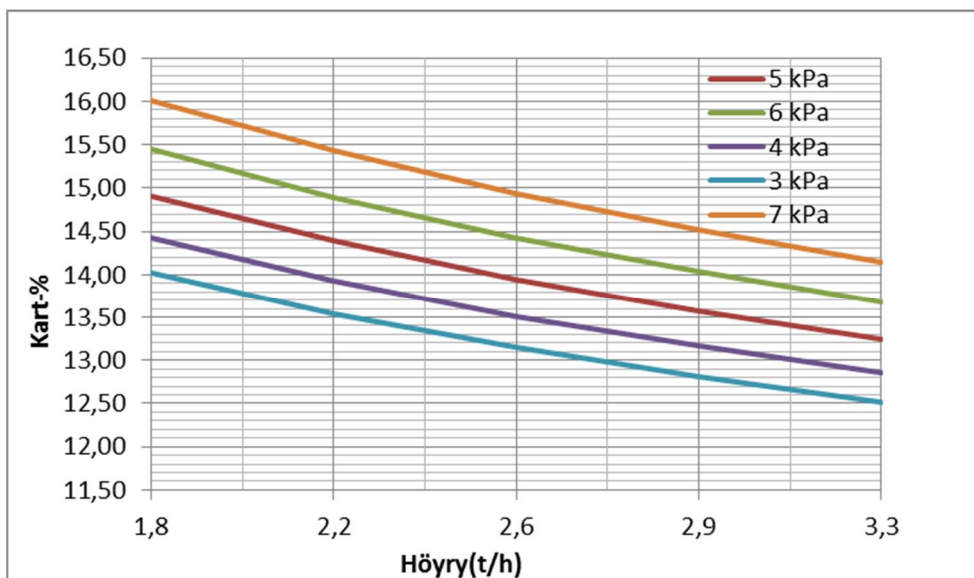


Kuva 19. Tyhjötislauskolonni DA-31001 ja simuloinneissa käytetyt muuttujat

Kuvan 19 simulointimallissa tuotemäärät on skaalattu vastaamaan bitumiyksikön todellista syöttötasoa 155 t/h. Syöttö jakaantuu nesteen ja kaasun kesken pohjille 8 ja 9. Kiertopalautuksille asetettiin vakiovirtaukset ja tuotteiden laatua säädettiin ulosottomäärällä. Kart- jakeen laadulle rajaksi asetettiin leikkauksen lämpötila (TBP 95-%) 565 °C ja kakt- jakeen laadulle lämpötila (TBP 95-%) 415 °C. Kuvasta 20 havaitaan, että strippaushöyryillä on merkittävä vaikutus tyhjötislauskolonnissa DA-31001. Pohjatuotteen kart p-% laskee merkittävästi lisäämällä strippaushöyryä. Tietosuojallisista syistä simuloinnin yksityiskohtaisia tuloksia ei julkaista tässä työssä.

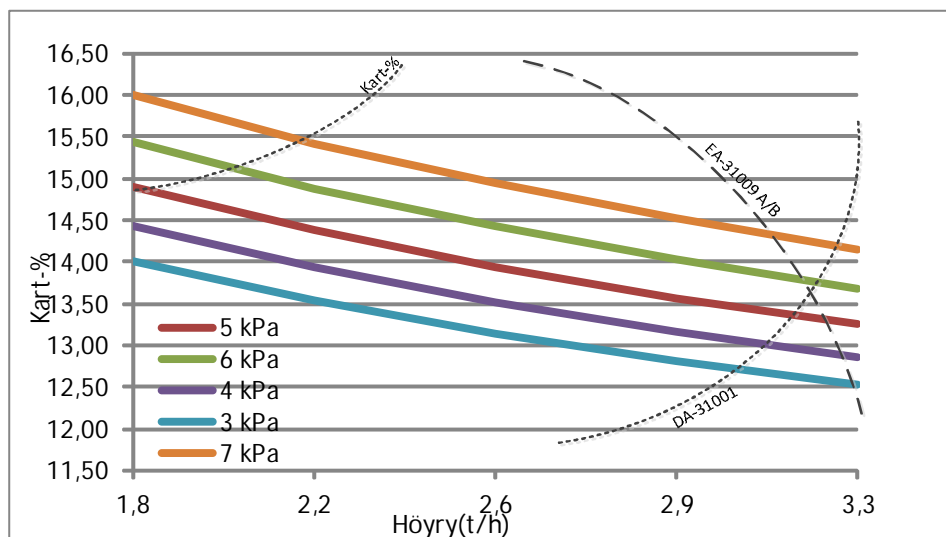
## 8 Tuottavuus

Simulointien perusteella laskettu tuottavuus arvio strippaushöyryjen optimoinnista perustuu kart-jakeen määrään ja sen nykyiseen markkinahintaan 4 kuukauden keskiarvona kesä-toukokuulta, vuodelta 2015. Rahallinen arvo on otettu jalostusmarginaaliraportista tuotannonsuunnittelulta. Pohjatuotteen kart-% on hyödyllinen tieto tarkasteltaessa erotustehokkuutta kolonnissa (kuva 20). Kart-%:n laskiessa pohjatuotteessa, tuotto kasvaa, koska kart- jaetta saadaan ulosottona kolonnista enemmän, ja se on paljon arvokkaampaa kuin kolonnin pohjalta saatava pohjaöljy(ÖP). Laatuvaatimuksena oli kart:n leikkauksen lämpötila (TBP 95-%) 565°C.



Kuva 20. Pohjatuotteen kart-% eri painetasoilla ja strippaushöyrymäärillä

Strippaushöyryä ei voida lisätä loputtomiin. On syytä tiedostaa ja huomioida kolonniin liittyviä rajoitteita, jotka on esitetty kohdassa 3.2 tislauskolonnin rajoitteet. Tässä työssä rajoitteita ei käsitellä tarkemmin, mutta kuvaan 21 on hahmotettu tiettyjä rajoitteita ope- roitaessa strippaushöyryjä (ks. taulukko 6 ja 7, s.21)



Kuva 21. Strippaushöyryjen operointiin liittyviä rajoitteita, jossa EA-31009 A/B= kolonnin ylimenovaihtimet, DA-31001= Tyhjötislauskolonni ja Kart-%= Pohjatuotteeseen jäävä kart:n määrä.

Todellinen strippaushöyryjen operointialue löytyy rajoitteiden sisältä. Kuvaa 21 tarkas- teltaessa on syytä tiedostaa, että kuvaan liittyvät rajoitteet ovat suuntaa antavia. Todel- liset arvot rajoitteille on selvitettävä yksityiskohtaisesti.

Kokonaistuotto perustuu kart- jakeen markkinahintaan, pohjaöljyn vähenemisestä me- netettyyn tuottoon ja höyrynkäytön lisäämisestä aiheutuneisiin kuluihin. Strippaus- höyryä lisättäessä pohjaöljyn määrä vähenee ja vastaavasti kart:n määrä kasvaa. Kakt- jae ajetaan nykytilanteessa kokonaisuudessaan kart- jakeen sekaan. Kakt- jaetta ei huomioida kokonaistuotossa, koska kakt- jakeen muutos lisättäessä strippaushöyryjä on merkityksetön (< 9 kg/h). Laskelmassa on huomioitava, että kolonnin painetason on oletettu pysyvän muuttumattomana 4 kPa(a):ssa höyryn lisäyksen jälkeen. Esimerkki- laskelmaa varten toteutunut painetaso, syöttö ja höyrymäärä kolonnissa on koottu tau- lukkoon 10 Nesteen TOP-järjestelmästä 25.1.2014.

Taulukko 10. Operointiolosuhteet 25.1.2014 ja simuloinnin olosuhteet, jossa Paine = Kolonnin paine, KART = Raskas kaasuöljy, ÖP = Pohjaöljy ja KART-% = Pohjatuotteeseen jäävä raskas kaasuöljy.

Biy yksikkö	Toteutunut	Simuloitu	Erotus
Paine (kPa)	4	4	--
Strippaushöyry (t/h)	2,4	2,9	0,5
Syöttö t/h	155	155	--
KART t/h	62,126	62,664	0,538
ÖP (t/h)	80,567	79,998	-0,569
KART-%	13,72	13,16	-0,56

Toteutuneita tuotesaantoja verrattiin simuloituihin arvoihin, mikäli höyryä olisi lisätty 0,5 t/h 25.1.2014. Strippaushöyrymäärän lisääntyessä kart:n määrä kasvoi 0,538 t/h ja vastaavasti pohjaöljyn määrä laski 0,569 t/h (taulukko 10). Lisääntyneellä kart- jakeelle laskettiin tuotto, joka on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Kart:sta saatava tuotto lisääessä strippaushöyryä

	Höyry t/h	KART t/h	Arvo €/t	Tuotto €/h	Tuotto €/24h
Toteutunut	2,4	62,126	1	62	1491
Simuloitu	2,9	62,664	1	63	1504
Erotus	0,5	0,538	-	0,54	13

Kart- jakeen määrä kasvaa strippaushöyryä lisääessä, mutta vastaavasti pohjaöljyä saadaan vähemmän. Pohjaöljyllä on myös hinta, joka on huomioitava. Taulukossa 12 on esitetty pohjaöljyn vähenemisestä aiheutuneet tuotannolliset menetykset lisääessä strippaushöyryä 0,5 t/h.

Taulukko 12. Pohjaöljyn tuottavuus lisääessä strippaushöyryä

	Höyry t/h	ÖP t/h	Arvo €/t	Tuotto €/h	Tuotto €/24h
Toteutunut	2,4	80,567	0,5369	43,3	1038
Simuloitu	2,9	79,998	0,5369	43,0	1031
Erotus	0,5	0,569	-	-0,3	-7,3

Höyryn valmistuskustannukset tuotettua tonnia kohden muuttuvat huomattavasti kuu-kausitasolla johtuen kattiloiden polttoaineista, energiatehokkuudesta ja jätevesikustannuksista. Esimerkkilaskelma kuluista on tehty 16 bar(g):n höyryn keskiarvohinnalla al-

kuvuodesta 2015, lisättynä muuttuvia kustannuksia 0,50 euroa/t. Muuttuvat kustannukset koostuvat jätevesien käsittelystä aiheutuneista kuluista (taulukko 13).

Taulukko 13. Strippaushöyryn kustannukset

	Höyry t/h	Hinta €/t(höyry)	Hinta €/h	Hinta €/24h
Toteutunut	2,4	0,0754	0,18096	4,34304
Simuloitu	2,9	0,0754	0,21866	5,24784
Erotus	0,5	-	-0,0377	-0,9048

Tietosuojallisista syistä johtuen tuotteiden hinnat on ilmoitettu suhteellisina lukuarvoina. Kart- jakeelle annettiin hinnaksi 1 €/t, ja muiden komponenttien arvot (€/t) on suhteutettu kart:n hinnan mukaan.

## 9 Yhteenveto

Tässä insinööritoiminnassa selvitettiin strippaushöyryjen vaikutuksia tyhjötislauskolonnissa DA-31001 käyttäen apuna simulointimallia. Työ rajattiin koskemaan tyhjötislauskolonniin DA-31001 syötettävää strippaushöyryä. Tyhjötislauskolonniin DA-31001 syötettävä strippaushöyry on ollut vakiovirtausmäärällä useita vuosia, ja yksikön höyryistä ei ole aikaisemmin tehty selvityksiä. Tästä johtuen ei ole ollut saatavilla tietoa siitä, miten strippaushöyryä tulisi operoida ja millä tavalla strippaushöyrysyötön määrä vaikuttaa kolonnin erotuskykyyn.

Työn ensimmäisessä vaiheessa käytiin läpi tislusprosessia, tyhjötislausta ja vesi-höyrytislausta. Toisessa vaiheessa tutustuttiin Porvoon jalostamon pohjaöljyketjuun ja työssä varsinaisesti käsiteltävään bitumiyksikköön. Teorian pohjalta siirryttiin työn kohteelliseen osuuteen ja selvitettiin simuloimalla strippaushöyryjen vaikutuksia tyhjötislauskolonniin ja sen tuotteisiin.

Tuloksien tarkastelun jälkeen pystyttiin toteamaan, että strippaushöyryä on mahdollista operoida tehokkaammin sekä kustannuksien että kolonnin toiminnan kannalta. Rahallinen potentiaali vuositasolla on huomattava. Bitumiyksikön kolonniin syötettävä strippaushöyrymäärä on pidetty nykyhetkeen asti vakiona. Potentiaali tuotossa on kuitenkin huomattava, mikäli strippaushöyryä operoidaan kolonnissa vallitsevien olosuhteiden mukaisesti.



Työssä todettiin, että strippaushöyryllä on suuri vaikutus kolonnin huipun paineeseen. Kolonnin paineen vaihdellessa vuositasolla huomattavasti strippaushöyryllä voidaan kompensoida osittain tätä vaihtelua. Etenkin talvikuukausien aikana kolonnin painetaso on huomattavasti alhaisempi kuin kesäkuukausina. Alhainen painetaso kolonnissa mahdollistaisi strippaushöyryn lisäämisen, ja sitä kautta saadaan tehostettua tislautapahtumaa. Vastaavasti kolonnissa vallitsevan korkean painetaso aikana olisi suositeltavaa vähentää strippaushöyryä, mikä parantaa kolonnin alipainetta.

Työ onnistui mielestäni tarvittavalla tasolla, koska tuloksista saatiin selvitettyä strippaushöyryn vaikutukset tyhjötislauksessa. Ongelmitta työn suoritus ei kulkenut. Tislaukseen liittyvä lähdemateriaali oli suurimmalta osin englanninkielistä ja kääntämiseen kului paljon aikaa. Simuloinnit olivat haastavia, koska tietämykseni simuloinnista oli ruohonjuuritasolla. Muilta osin työn suoritus sujui alustavan tarkoituksen mukaisesti ja tulokset vastaavat odotuksia.

## 10 Suositukset

Simuloinnin laajuutta rajattiin tekemällä oletuksia. Oletuksista on syytä antaa suosituksia jatkoselvityksille ennen mahdollisia koeajoja:

- Kolonnin paine muuttuu operoitaessa strippaushöyryä, mutta simulointimalli ei ota huomioon tätä paineen vaihtelua. Tästä johtuen kolonnin paineprofiili syötettiin simulointimalliin manuaalisesti. On syytä tutkia tarkemmin paineen muutosta lisättäessä strippaushöyryä.
- Lisääntyneen strippaushöyrysyötön mukana pohjasta kulkeutuu enemmän metalleja (vanadiini+nikkeli) kart-jakeeseen. Tämä on syytä huomioida, koska jatkoyksikön katalyyteille on määritetty laaturaja metallien määrästä 2,0 mg/kg. Mikäli metallipitoisuudet syötössä kasvavat, ne kasvavat myös kart-jakeessa.
- Strippaushöyryn lisääminen kuormittaa kolonnin ylimenojärjestelmässä olevia ylimenovaihtimia EA-31009 A/B. On syytä tutkia vaihtimien kapasiteetin riittävyyttä tarkemmin etenkin lämpimien kesäkuukausien aikaiselta ajankohdalta.

- Työssä oletettiin kolonnin täytekappalepetien kapasiteetin olevan riittävä. On syytä tutkia tarkemmin petien kapasiteettia virtauksien kasvaessa kolonnin sisällä.
- Tuottoarvio on suuntaa antava, ja on syytä tarkastella kokonaistuottoa vuositason tarkemmin ennen mahdollista koeajoa.

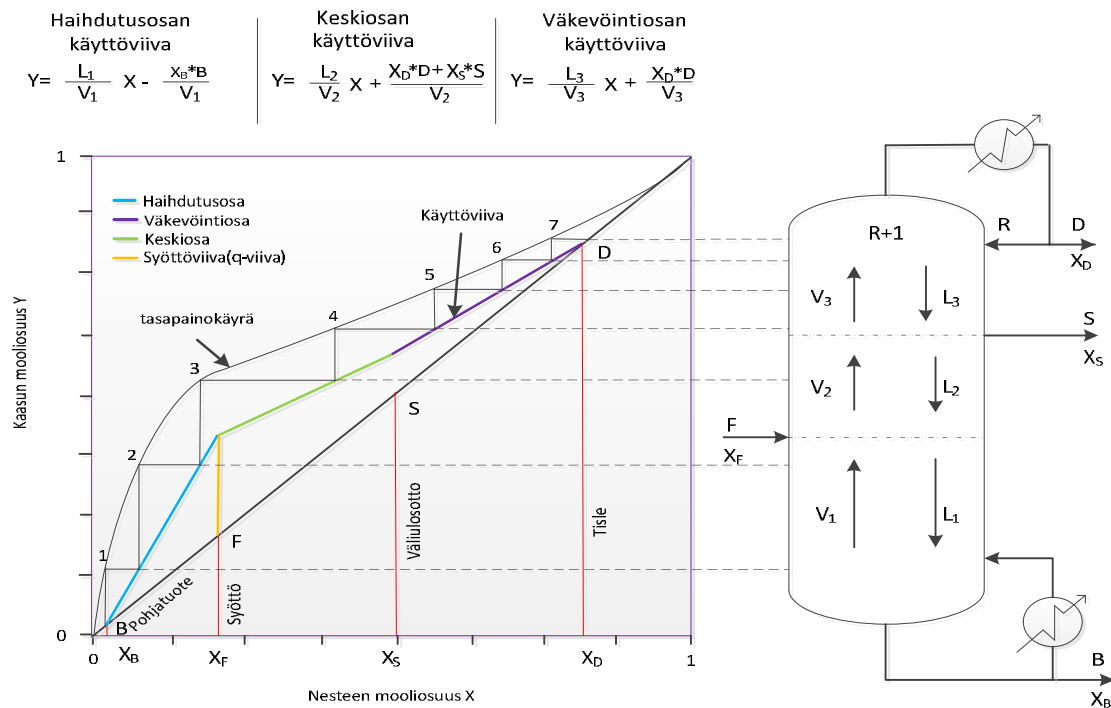
## Lähteet

- 1 Kister, Henry Z.1989, Distillation operation. New York:McGraw-Hill inc.
- 2 Pihkala, Juhani. 2011, Prosessitekniikka. Helsinki: Opetushallitus.
- 3 Sandelin, Peter. 1996, Tislauksen perusteet. Nesteen sisäinen koulutusmateriaali.
- 4 Kister, Henry Z.1992, Distillation Design.New York:McGraw-Hill inc.
- 5 Kinnula, Tuomo.1987, Aineensiirtoprosessit. Ammattikasvatushallitus.
- 6 Lahdenperä, Olli. Middle distillate trader, Neste, Porvoo. Suullinen tiedonanto 10.8.2014
- 7 Tamminen, Tapani. Vuoropäällikkö, Neste, Porvoo. Suullinen tiedonanto 13.6.2014
- 8 TOP-järjestelmä. Nesteen käyttämä prosessimittausjärjestelmä.
- 9 Kurvinen, Jukka. 2015. Bitumiyksikön prosessikuvaus. Nesteen laatu-järjestelmä.OQD-651.
- 10 COMA/HHEL. 2007. Bitumiyksikön suojausten toimintakuvaus. Nesteen laatu-järjestelmä.OQD-572
- 11 Distillation handbook. 1994. Verkkodokumentti. APV.<  
[http://userpages.umbc.edu/~dfrey1/ench445/apv\\_distill.pdf](http://userpages.umbc.edu/~dfrey1/ench445/apv_distill.pdf)> Luettu  
 3.1.2014

- 12 Crude Distillation. 2014. Verkkodokumentti. John Jechura Colorado school of mines.  
[http://inside.mines.edu/~jjechura/Refining/03\\_Crude\\_Units.pdf](http://inside.mines.edu/~jjechura/Refining/03_Crude_Units.pdf) Päivitetty 19.8.2015. Luettu 15.9.2015
- 13 OiLi. Nesteen käyttämä näyteanalyysien kirjausjärjestelmä.
- 14 Sushil, KC. 2014. Application of the absorption heat pump in an oil refinery. Insinöörityö. Aalto university
- 15 Tham, M.T. 1997. Verkkodokumentti. Distillation introduction. <  
<http://www.slideshare.net/mrhempAHotmailDOTcom/introduction-to-distillation>> Luettu 22.11.2014
- 16 Pines, Markku. 2010. BIY teoriapaketti. Nesteen sisäinen koulutusmateriaali
- 17 Vacuum distillation in petroleum refinery. Verkkodokumentti.  
<https://chemengineering.wikispaces.com/Vacuum+distillation+in+petroleum+refinery> Luettu 20.10.2015

## McCabe-Thiele menetelmä

Vuonna 1925 McCabe ja Thiele julkaisivat graafisen menetelmän yhdistääkseen tasapainokäyrän ja kolonnin käyttöviivat, arvioidakseen tietyn seoksen ja kolonnin käyttöpaineen mukaan tarvittavien erotusaskeleiden määrää ja kiertopalautuksia, jotta saadaan tarvittava erotustehokkuus aikaan kolonnissa. Kuvassa 22 on esitetty McCabe-Thielen diagrammi. Pohjien lukumäärän laskenta etenee kolonnin pohjalta syöttökohdan alapuolella olevan haihdutusosan käyttöviivan ja sen yläpuolella olevan väkevöintiosan käyttöviivan ja tasapainokäyrän avulla. Tasapainokäyrällä olevien pisteiden (kuvassa 22 pisteet numeroitu 1-7) määrä kuvaa kolonnin teoreettisten pohjien lukumäärää ja kuvan 22 tapauksessa välipohjia on 7.



Kuva 22. McCabe-Thiele diagrammi

McCabe-Thielen diagrammin määrittystä varten tarvitaan höyry-nestetasapainokäyrä, tieto kolonnin syötön pitoisuudesta, väkevöintiosan ainetase ja haihdutusosan ainetase sekä syöttövirtauksen olomuoto (kuva 23). Näiden tietojen perusteella voidaan laskea väkevöintiosalle, keskiosalle ja haihdutusosalle käyttöviivat ja käyttöviivojen avulla selvittää teoreettisten pohjien lukumäärä kuvan 22 mukaisesti.

Lasketaan esimerkkilasku kuvassa 22 esitetyn McCabe-thielen diagrammin laadintaan. Etanoli-vesiseos ( 20 mol-% etanolia) tislataan siten, että tisle sisältää 80 mol-% etanolia ja pohjatuote 2 mol-% etanolia. 15 % syötetystä etanolista ulos otetaan väliulosoton S kautta ja sen koostumus on 50 mol-% etanolia. Syöttö on kiehumispisteessä ja kolonnin palautus-suhde  $R = 2,5$ . Palautussuhteella tarkoitetaan kolonniin palautetun nestevirran ja tisleen kokonaisvirran suhdetta. Oletetaan syötön määrän olevan 80 mol/h.

#### Ainetaseet:

Kokonaistase (mol/h)  $F = D+S+B$ . Väliulosoton määrä voidaan laskea yhtälöllä  $0,15 * X_F * F = X_S * S$  missä 0,15 = väliulosotosta otetun etanolin prosentuaalinen määrä,  $X_F$  = etanolin mooliosuus syötössä,  $F$  = syötön moolivirtaus,  $X_S$  = etanolin mooliosuus väliulosotossa ja  $S$  = väliulosoton moolivirtaus.

$$0,15 * 0,20 * 80 \text{ mol/h} = 0,50 * S$$

$$S = \frac{0,15 * 0,20 * 80 \text{ mol/h}}{0,50} = 4,8 \text{ mol/h}$$

Kokonaistase  $F = D+S+B$ , joten yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon  $X_F * F = X_D * D + X_S * S + X_B * B$ , missä  $X_D$  = etanolin mooliosuus tisleessä,  $D$  = tisleen moolivirtaus,  $B$  = pohjatuotteen moolivirtaus ja  $X_S$  = etanolin mooliosuus väliulosotossa. Ratkaistaan yhtälön avulla  $D$ .

$$F = D + S + B$$

$$80 \text{ mol/h} = D + 4,8 \text{ mol/h} + B \rightarrow B = 75,2 \text{ mol/h} - D$$

Sijoitetaan lukuarvot yhtälöön  $X_F * F = X_D * D + X_S * S + X_B * B$  ja ratkaistaan yhtälön avulla tisleen  $D$  moolivirtaus:

$$0,2 * 80 \text{ mol/h} = 0,8 * D + 0,5 * 4,8 \text{ mol/h} + 0,02 * 75,2 \text{ mol/h} - D$$

$$16 \text{ mol/h} = 0,8D + 2,4 \text{ mol/h} + 1,504 \text{ mol/h} - 0,02D$$

$$16 \text{ mol/h} - 2,4 \text{ mol/h} - 1,504 \text{ mol/h} = 0,8D - 0,02D$$

$$D = 15,5 \text{ mol/h}$$

Nyt voidaan ratkaista B yhtälöllä  $B = F - D - S$  missä B = pohjatuotteen moolivirtaus, F = syötön moolivirtaus, D = tisleen moolivirtaus ja S = väliulosoton moolivirtaus.

$$B = 80 \text{ mol/h} - 15,5 \text{ mol/h} - 4,8 \text{ mol/h}$$

$$B = 59,7 \text{ mol/h}$$

Tarkistetaan kokonaistase  $F = 15,5 \text{ mol/h} + 4,8 \text{ mol/h} + 59,7 \text{ mol/h} = 80 \text{ mol/h}$

Väkevöintiosan käyttöviiva:

$L_3 = R \cdot D$  missä,  $L_3$  = nesteen moolivirtaus, R = palautuksen suhde ylimenoon ja D = tisleen moolivirtaus

$$L_3 = 2,5 \cdot 15,5 \text{ mol/h} = 38,75 \text{ mol/h}$$

$V_3 = (R+1) \cdot D$  missä,  $V_3$  = höyryn moolivirtaus ja D = tisleen moolivirtaus

$$V_3 = (2,5 + 1) \cdot 15,5 \text{ mol/h} = 54,25 \text{ mol/h}$$

Väkevöintiosan käyttöviivan yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon  $y = \frac{L_3}{V_3} X + \frac{X_D \cdot D}{V_3}$ , missä,

$L_3$  = nesteen moolivirtaus,  $V_3$  = höyryn moolivirtaus,  $X_D$  = etanolin mooliosuus tisleessä.

Väkevöintiosan käyttöviiva jatkuu y-akselille asti ja ohittaa syöttöviivan F. Leikkauspiste

voidaan merkitä yhtälöllä  $y_0 = \frac{1}{R+1} X_D$ , missä  $y_0$  = y-akselin ja käyttöviivan leikkauspiste.

$$y = \frac{38,75 \text{ mol/h}}{54,25 \text{ mol/h}} X + \frac{0,8 \cdot 15,5 \text{ mol/h}}{54,25 \text{ mol/h}} = \mathbf{0,714x + 0,228}$$

Keskiosan käyttöviiva:

$$V_2 = V_3 = 54,25 \text{ mol/h}$$

$L_2 = L_3 - S$  missä  $S$  = väliulosoton määrä ja  $L_3$  = nesteen moolivirtaus

$$L_2 = 38,75 \text{ mol/h} - 4,8 \text{ mol/h} = 33,95 \text{ mol/h}$$

Keskiosan käyttöviivan yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon  $y = \frac{L_2}{V_2} X + \frac{X_D * D + X_S * S}{V_2}$  missä  $L_2$  = nesteen moolivirtaus,  $V_2$  = höyryn moolivirtaus,  $X_D$  = etanolin mooliosuus tisleessä,  $D$  = tisleen moolivirtaus,  $X_S$  = etanolin mooliosuus väliulosotossa ja  $S$  = väliulosoton moolivirtaus.

$$y = \frac{33,95 \text{ mol/h}}{54,25 \text{ mol/h}} X + \frac{0,8 * 15,5 \text{ mol/h} + 0,5 * 4,8 \text{ mol/h}}{54,25 \text{ mol/h}} = \mathbf{0,625x + 0,272}$$

Haihdutuosan käyttöviiva:

$$V_1 = V_2 = 54,25 \text{ mol/h}$$

$L_1 = L_2 + F$ , missä  $L_2$  = nesteen moolivirtaus  $F$  = syötön moolivirtaus

$$L_1 = 33,95 \text{ mol/h} + 80 \text{ mol/h} = 113,95 \text{ mol/h}$$

Haihdutuosan käyttöviivan yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon  $y = \frac{L_1}{V_1} X - \frac{X_B * B}{V_1}$ , missä  $L_1$  = nesteen moolivirtaus,  $V_1$  = höyryn moolivirtaus,  $X_B$  = etanolin mooliosuus pohjatuotteessa ja  $B$  = pohjatuotteen moolivirtaus. Haihdutuosan käyttöviiva leikkaa väkevöintiosan käyttöviivan ja syöttöviivan (q-viiva).

$$y = \frac{113,95 \text{ mol/h}}{54,25 \text{ mol/h}} X - \frac{0,02 * 59,7 \text{ mol/h}}{54,25 \text{ mol/h}} = \mathbf{2,100x - 0,022}$$

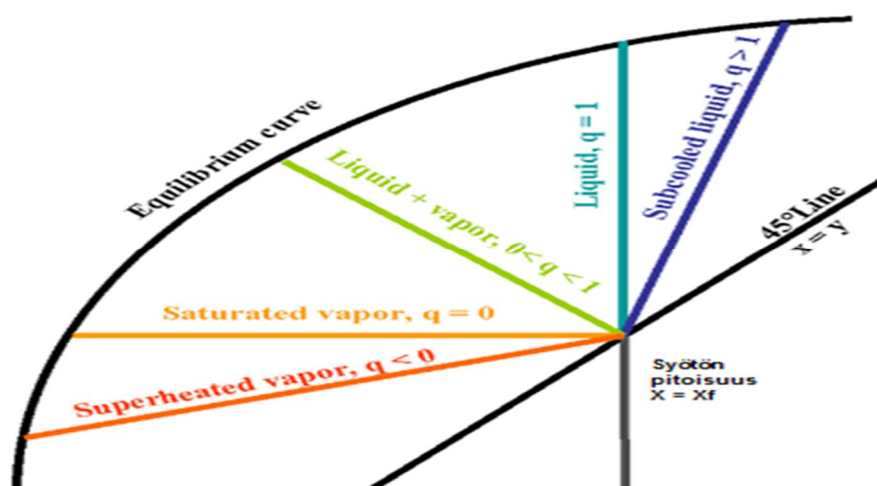


Syöttöviiva:

Syöttöviivan (q-viiva) kulmakerroin on  $kk = -(\frac{L_f}{V_f})$ , missä  $L_f$  = syötteen nestemäisen osan virtausmäärä ja  $V_f$  = syötteen höyrymäisen osan virtausmäärä. Syöttöviivan kulmakerroin määräytyy kuvan 23 mukaan.

$$-\frac{L_f}{V_f} = -\frac{F}{0} = \infty$$

Syöttöviiva on esimerkkilaskun tapauksessa (kuva 22) kohtisuoraan ylöspäin, koska syöttö on kiehumispisteessä olevaa nestettä. Kuvassa 23 on selkeytetty syötön olo-  
muodon vaikutusta syöttöviivan kulmakertoimeen.



Kuva 23. Syötön olomuodon vaikutus syöttöviivan kulmakertoimeen

McCabe-Thielen menetelmä auttaa arvioimaan tislauksen vaikeutta. Mitä enemmän välipohjia tarvitaan sitä vaikeampi tislautapahtuma on kyseessä. Suunnittelussa voidaan yhdellä silmäyksellä arvioida tasapainokäyrästä, onko tislauksen helppo vai vaikea, millaisiin pitoisuuksiin tislauksella päästään ja minkälaista palautussuhdetta täytyy käyttää.

## **BIY STRIPPAUSHÖYRYN KOEAJOSUUNNITELMA**

### **1 Lähtökohdat**

Koeajon tarkoituksena on selvittää strippaushöyryn vaikutuksia tyhjötislauskolonniin DA-31001 ja siitä saataviin tuotteisiin (Kart, Kakt ja ÖP). Bitumiyksikön strippaushöyryjen koeajon pohjana toimii tämä insinöörityö ja pyrkimyksenä on verifioida simuloinneista saatujen arvojen todenmukaisuus. Simulointien tulokset löytyvät työn liitteistä.

Koeajo pitää suorittaa kokonaisuudessaan turvallisesti ja vaarantamatta yksikön normaalikäyntiä.

### **2 Koeajon toimenpiteet**

Koeajon aikana yksikön syöttö pyritään pitämään tasaisena 155 t/h, jotta tuloksista saadaan vertailukelpoisia. Koeajo pyritään suunnittelemaan ajankohdalle, jolloin pohjaöljyketjun ajosuunnitelmat eivät muutu. Koeajon aikana pohjaöljyketju normaalisti RT3à TT2/BIYà PÖY.

Mikäli koeajon aikana yksikön syöttötaso tai pohjaöljyketjun ajosuunnitelmat muuttuvat bitumiyksikön osalta, koeajo keskeytetään ja palataan takaisin normaaliin strippaushöyrymäärään askeleittain. Koeajo vie aikaa noin 2 vuorokautta, mikäli ei tule ongelmia. Mikäli strippaushöyrymäärän lisäys aiheuttaa kolonniin toiminnallisia ongelmia, palataan takaisin edelliseen strippaushöyrymäärään ja tarkastellaan jatkotoimenpiteitä.

#### Mittauksien/virtauksien tarkistus

FC-31032 Kartà KARP3

FI-31020 Pohjaöljy

PI-31007 Kolonnin huipun paine

FCA-31002 Syöttö kolonniin

FC-31023 Strippaushöyryn syöttö

TIA-31045 Kolonnin ylimenokaasujen lämpötila

TCA-31012 Kolonnin syötön lämpötila

#### Koeajon eteneminen

Aloitetaan koeajo nykyisestä höyrymäärästä 2,4 t/h ja nostetaan askeleittain höyrymäärää 0,1 t/h. Jokaisen höyrymäärän lisäyksen jälkeen odotetaan noin 3 tuntia, että kolonni ehtii tasaantua ja viedään näytteet kohdan 4 mukaisesti. Mikäli näytteiden tulosten puolesta voidaan jatkaa koeajoa, siirrytään nostamaan höyrymäärää.

2,4 t/hà näytteet

2,5 t/hà näytteet

2,6 t/hà näytteet

2,7 t/hà näytteet

2,8 t/hà näytteet

2,9 t/hà näytteet

3,0 t/hà näytteet

3,1 t/hà näytteet

3,2 t/hà näytteet

3,3 t/hà näytteet

3,4 t/hà näytteet

3,5 t/hà näytteet

3,6 t/hà näytteet

### **3           Seurattavat kohteet**

Erityistä jatkuvaa seurantaa vaatii kolonnin täytekappalepetien paine-erot, koska strippaushöyryn virtausmäärän kasvaessa kolonnin sisäiset virtaukset kasvavat.

Koeajojen aikana on syytä kirjata jokainen muutos tai hälytys JAWA- päiväkirjaan. Seurataan tarkasti tuotteiden analyysejä. Koeajon aikana KART:n metallipitoisuutta on seurattava **erityisesti** (max 2 mg/kg), koska strippaushöyryn lisäys nostaa kasvavassa määrin metalleja KART:n mukana. Voidaan kompensoida uunin ulostulolämpöjä laskemalla.

#### Virtaukset

Kiertopalautukset: FC-31055, FC-31027, FC-31028 ja FC-31054

Tuotteet: FC-31034, FC-31032 ja FC-31052

#### Lämpötilat

TC-31025, TCA-31012, TI-31075, TI-31040

Kolonnin DA-31001 sisälämpötilat

#### Paineet

PI-31007, PDIA-31029, PDIA-31006, PI-31031 ja PI-31005

#### 4 Analyysit

Näytteidenoton jälkeen odotetaan analyysien valmistumista. Mikäli analyysien tuloksien perusteella on mahdollista jatkaa koeajoa, niin lisätään strippaushöyryä seuraavan askeleen verran. Näin toimitaan jokaisessa strippaushöyryn lisäyksessä

Syöttö - ÖPS3Z (RT3)

- 2 kertaa päivässä, varmistetaan syötön tasalaatuisuus koeajon aikana.

KAKT - KAKTBZ KARP3

- Kaksi näytettä jokaisen strippaushöyrymuutoksen jälkeen, viipymä huomioiden (2-3 tuntia). Näytteiden aikataulutus suoraan oili järjestelmään ettei näytteitä ei jää ottamatta.

KART – KARTBZ

- Kaksi näytettä jokaisen strippaushöyrymuutoksen jälkeen, viipymä huomioiden. Näytteiden aikataulutus suoraan oili järjestelmään, että näytteitä ei jää ottamatta.

ÖP - ÖPTBZ, päivittäin

- Kaksi näytettä jokaisen strippaushöyrymuutoksen jälkeen, viipymä huomioiden. Näytteiden aikataulutus suoraan oili järjestelmään, että näytteitä ei jää ottamatta.

**HUOM!! Tätä koeajosuunnitelmaa ei saa käyttää suoraan tällaisenaan koeajoihin!!**

